

## Los manantiales kársticos

### *Karst springs*

JOSÉ MIGUEL ANDREU<sup>1</sup>, BARTOLOMÉ ANDREO<sup>2</sup>, JOSÉ M<sup>a</sup> CORTÉS<sup>3</sup>, JOSE ANTONIO CUCHÍ<sup>4</sup>, ROSA M<sup>a</sup> MATEOS<sup>5</sup> Y JUAN JOSÉ PÉREZ<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Apdo. Correos, 99, 03080 Alicante. E-mail: andreu.rodas@ua.es

<sup>2</sup> Dpto. de Geología y Centro de hidrogeología de la Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. E-mail: andreo@uma.es

<sup>3</sup> SIDMAR, Estudios y Servicios Oceanográficos, S.L. Avda. País Valenciano, 22, 03720. Benissa, Alicante E-mail: jcortes@sidmar.es

<sup>4</sup> Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza, Ctra. Cuarte s/n, 22071 Huesca E-mail: cuchi@unizar.es

<sup>5</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Unidad de Granada. Urbanización Alcázar del Genil, 4. Edificio Zulema Bajos. 18006 Granada. E-mail: rm.mateos@igme.es

<sup>6</sup> Dpto. de Ingeniería y Morfología del Terreno. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. E-mail: silexjuan@hotmail.com

**Resumen** Los manantiales kársticos son los puntos de salida del agua que circula y está almacenada en los acuíferos kársticos. La descarga de estos manantiales puede variar muchísimo, desde pequeños rezumes a caudales de varias decenas de metros cúbicos por segundo, capaces de originar ríos. A lo largo de la historia, los manantiales kársticos han sido determinantes a la hora de establecer asentamientos humanos y son numerosos los pueblos y ciudades que se abastecen de sus aguas, generalmente de excelente calidad. El comportamiento de los acuíferos kársticos difiere en gran medida de otros tipos de acuíferos y sus manantiales presentan ciertas singularidades. El presente trabajo pretende mostrar algunos de estos aspectos a partir de ejemplos de varios manantiales de la geografía española.

**Palabras clave:** Acuífero kárstico, hidrograma, karst, manantiales.

**Abstract** *Karst springs are the outlets of the water that flows and is stored in karstic aquifers. The discharge of these springs can vary greatly, from small leakages virtually unnoticed to flow rates of several tens of cubic meters capable of originating rivers. Throughout history, karst springs have been determining factors when establishing settlements and there are numerous towns and cities supplied by those spring waters, generally of an excellent quality. The behavior of karst aquifers differs greatly from other types of aquifers and their springs have special features. This paper aims to show some of these features from several springs of the Spanish geography.*

**Keywords:** *Hydrograph, karstic aquifer, karst, springs.*

### INTRODUCCIÓN

Los manantiales han sido, a lo largo de la historia de la humanidad, lugares de encuentro y de vida. Numerosos pueblos y ciudades se han asentado en torno a ellos y constituyen el único recurso disponible en muchas regiones del planeta.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los manantiales se definen como aquellos lugares donde se produce la descarga de las aguas subterráneas. El agua que se infiltra en los acuíferos circula por su interior y, transcurrido un tiempo, termina retornando a la superficie. Aunque los manantiales se asocian a todo tipo de acuíferos, los manantia-

les kársticos despiertan una enorme curiosidad, ya que normalmente se ubican en parajes de gran belleza y su descarga suele ser muy espectacular. Algunos de ellos presentan elevados caudales (Tabla I). El presente trabajo se centra exclusivamente en este último tipo de manantiales y tiene como finalidad mostrar algunas de sus singularidades, así como recoger algunos ejemplos de nuestro país, con el objeto de exponer esa amplia diversidad de comportamiento.

Se denominan manantiales kársticos a las salidas de agua subterránea asociadas a terrenos afectados por fisuración y disolución (karstificación). En la gran mayoría de los casos se trata manantiales de

| MANANTIAL     | PAÍS         | $Q_{MÁX}$ (m <sup>3</sup> /s) | $Q_{MED}$ (m <sup>3</sup> /s) |
|---------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Matali        | Nueva Guinea | >240                          | 90                            |
| Trebisnica    | Hezergovina  | 300                           | 80                            |
| Dumanli       | Turquía      | >100                          | 50                            |
| Ljubliana     | Eslovenia    | 132                           | 39                            |
| Chinagshui    | China        | 545                           | 38                            |
| Ombla         | Croacia      | 154                           | 33,8                          |
| Vaucluse      | Francia      | 200                           | 29                            |
| Frio          | México       | 515                           | 28                            |
| Silver Spring | USA          | 36,3                          | 23                            |
| Aachquelle    | Alemania     | 24,1                          | 8,2                           |
| Al-Sinn       | Siria        | 23                            | 8,5                           |
| Kuhran        | Irán         | 12                            | 3                             |

Tabla I. Algunos de los grandes manantiales kársticos del mundo ( $Q_{máx}$ : caudal máximo y  $Q_{med}$ : caudal medio). Datos de varios autores, especialmente de Ford y Williams (2007) y Milanovic (2004).

acuíferos desarrollados en rocas carbonatadas (calizas y dolomías), pero también pueden encontrarse en otro tipo de rocas solubles, como las evaporíticas (yesos y sales), e incluso detríticas (conglomerados y areniscas calcáreas). Generalmente, se localizan en contactos de naturaleza tectónica o litológica, que en la mayoría de las ocasiones constituyen límites impermeables para el acuífero, y son frecuentes los que lo hacen en cavidades pertenecientes a la red de conductos kársticos desarrollado en el seno del acuífero. Suelen presentar un régimen irregular, lo que se traduce en una gran variabilidad en la descarga, la cual está directamente relacionada con el régimen de precipitaciones.

Como el resto de los manantiales suelen encontrarse preferentemente en las partes topográficas más bajas o deprimidas de los acuíferos, tales como el fondo de los valles, aunque también se localizan en el cauce de los ríos, lagos e incluso bajo el mar. No obstante, algunos de estos manantiales emergen en posiciones más elevadas debido a condicionantes tectónicos y/o geomorfológicos.

## EL MANANTIAL Y EL ACUÍFERO KÁRSTICO

### ¿Cómo funciona un manantial kárstico?

El funcionamiento de un manantial kárstico está estrechamente relacionado con las características hidrogeológicas del acuífero que drena. Los sistemas kársticos se caracterizan por ser muy heterogéneos, ya que la disolución aprovecha las grietas y fisuras que presenta la roca, que se distribuyen de forma irregular. La karstificación conduce a una nueva permeabilidad, propia del acuífero kárstico y distinta de la de los acuíferos porosos y fisurados (Mangin, 1975, 1984; Bakalowicz, 2005; Antigua et al., 2007; Freixes, 2014).

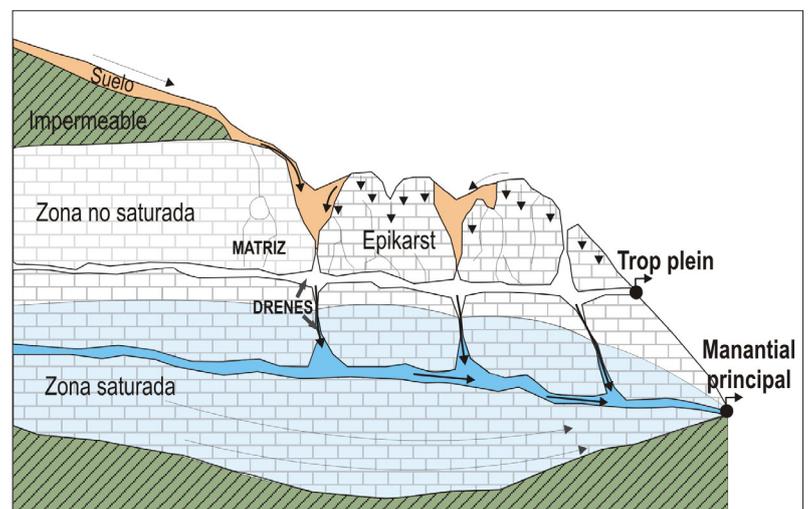
Desde el punto de vista hidrogeológico, existen varias propuestas de modelo conceptual de acuífero kárstico (Freixes, 2014; Pulido et al., 2016). La figura 1 presenta el propuesto por Hartmann et al., (2014), en la que básicamente está compuesto por dos componentes o elementos principales: la matriz y la red de conductos kársticos o drenes. La matriz corresponde a la roca que constituye el acuífero,

calizas y dolomías en la mayoría de los casos. A pesar de que estas rocas tienen valores de porosidad muy bajos, contienen pequeños espacios (poros y fisuras) donde el agua es capaz de introducirse y circular. La matriz tiene una gran capacidad de almacenamiento. La red de conductos kársticos o drenes son fracturas abiertas y oquedades que se intercalan en la matriz, fruto de la disolución de la roca a través de sus fisuras. Este sistema de drenes y conductos es volumétricamente muy pequeño en el acuífero; sin embargo, presenta una elevada permeabilidad y constituye la vía preferencial de circulación del agua.

Los manantiales kársticos están directamente relacionados con los drenes desarrollados en el acuífero. Generalmente, las redes kársticas están jerarquizadas de forma semejante a las redes fluviales. Esta jerarquización provoca la confluencia hacia unos pocos drenes que canalizan todo el flujo subterráneo del acuífero. Esto explica que muchos acuíferos kársticos presenten pocos puntos de descarga pero de elevados caudales (Fig. 1).

Por otro lado, la dualidad matriz-conductos kársticos también es la responsable de la elevada variabilidad de la descarga en los manantiales. Así, durante los periodos húmedos, cuando se producen las mayores entradas en el acuífero, los drenes se llenan rápidamente y en ellos se alcanzan niveles

Fig. 1. Modelo conceptual de funcionamiento de un acuífero kárstico (modificado a partir de Hartmann et al., 2014).



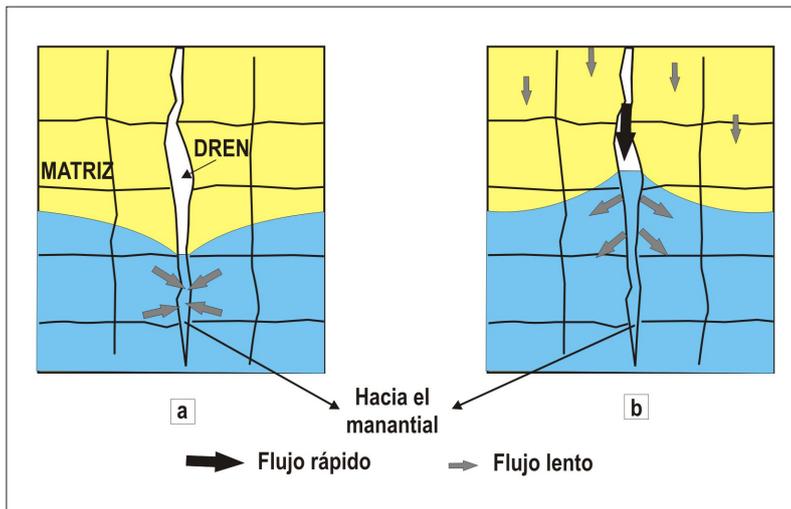


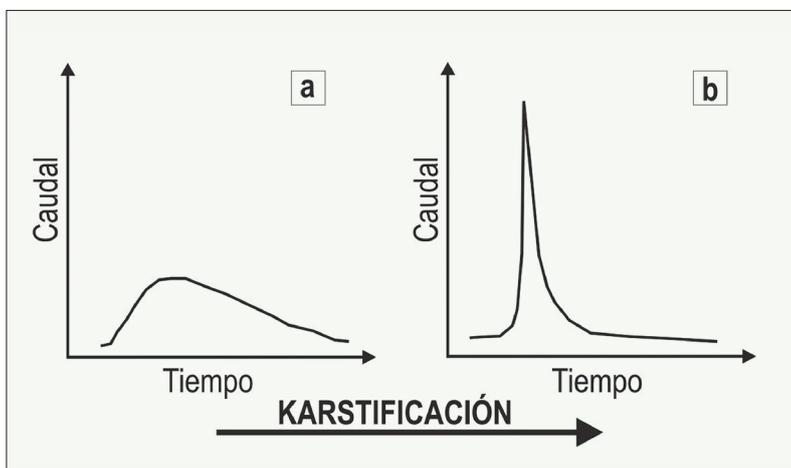
Fig. 2. Relación hidrodinámica entre matriz y drenes: (a) en condiciones de aguas bajas, cuando se produce un flujo de agua desde la matriz a los drenes, y (b) en aguas altas, cuando el flujo es desde los drenes hacia la matriz.

saturados más altos que en la matriz (Fig. 2). Esta situación fuerza el flujo hídrico desde los conductos hacia la matriz y provoca elevadas velocidades de circulación del agua en la red kárstica, que se traducen en significativos aumentos de caudal en el manantial. Por el contrario, durante los periodos de estiaje, la situación se invierte y la matriz presenta niveles más elevados que los drenes. En esas condiciones es cuando se produce un flujo de agua lento desde la matriz hacia los conductos, por lo que la circulación por los drenes es menor y el manantial presenta los caudales más bajos

#### La descarga de los manantiales kársticos

La caracterización de la descarga de los manantiales kársticos se suele realizar mediante los hidrogramas. Un hidrograma es una representación gráfica del caudal en función del tiempo. El uso de estas representaciones es también habitual en Hidrología para conocer la evolución de los caudales de los ríos y el comportamiento de las cuencas hidrográficas. En Hidrogeología Kárstica, el análisis de los hidrogramas permite obtener información sobre la estructura de circulación que predomina en el acuífero, así como de los procesos dinámicos que determinan el funcionamiento del manantial (Kiraly, 1971; Mangin, 1975; Antigüedad *et al.*, 2007; Ford y Williams, 2007; Hartmann *et al.*, 2014).

Fig. 3. Tipos de hidrogramas en función del grado de karstificación. (a) hidrograma característico de acuíferos porosos y fisurados, (b) hidrograma característico de acuíferos kársticos.



Con carácter general, la forma de un hidrograma indica el grado de modulación que realiza el acuífero frente a las entradas de agua (precipitaciones). Cuando estas entradas son perfectamente reguladas por el acuífero se dice que el sistema es inercial, y el manantial mostrará unas variaciones de caudal atenuadas, progresivas y regulares, tanto durante la crecida como en la decrecida. Eso da lugar a hidrogramas con forma achatada, tendida o roma. Este tipo de hidrogramas son característicos de medios con porosidad intergranular y fisuración, es decir, de acuíferos detríticos o fisurados; en definitiva, de acuíferos de flujo difuso. Contrariamente, cuando el acuífero no ejerce una regulación de las entradas, se habla de sistemas poco inerciales, en este caso los manantiales experimentan elevados aumentos de caudal seguidos de rápidas decrecidas y agotamientos. Los hidrogramas son estrechos y puntiagudos, característicos de sistemas kársticos o de flujo por conductos (Fig. 3). Entre ambos casos existe una enorme pluralidad de morfologías que responde a la amplia diversidad de acuíferos que genera la karstificación.

#### Tipos de manantiales

Desde principios del siglo XX se han establecido numerosas clasificaciones sobre manantiales naturales (Meinzer, 1923; Davis y De Wiest, 1971; Pitts y Alfaro, 2001), muchas de las cuales utilizan criterios de carácter descriptivo. Aspectos como la geología, su localización respecto al acuífero, el modo y forma en que tiene lugar su descarga, el caudal, o incluso las características térmicas o fisicoquímicas, entre otros muchos, son criterios habitualmente utilizados para catalogar los distintos tipos de surgencias naturales.

De forma más específica, en el campo de la Hidrogeología Kárstica se han realizado también diferentes propuestas para catalogar los manantiales. Las principales variables empleadas han sido la descarga, las condiciones geológicas, tectónicas y morfológicas, o el origen y procedencia del agua (Llopis, 1970; Swetting, 1972; Bogli, 1980; Bonacci, 1987; Milanovic, 2004; White, 2004; Ford y Williams, 2007). Entre las clasificaciones más completas se encuentra la propuesta por Smart y Worthington (2004) en la que a partir de 8 parámetros diferentes establecieron 41 categorías de manantiales kársticos. Sin entrar de forma exhaustiva en una clasificación tipológica de manantiales, se describen algunas de las principales características o tipologías de manantiales kársticos:

**Perennes o permanentes.** Son los más frecuentes; mantienen su descarga de forma continua, incluso en periodos de aguas bajas, aunque en esos momentos pueden experimentar una disminución de caudal acusadas. En general, suelen ser interesantes para su aprovechamiento. Algunos de ellos dan origen a arroyos y ríos.

**Intermitentes.** También denominados rítmicos o sifonales. A diferencia de los anteriores, estos manantiales son exclusivos de áreas kársticas. Son muy poco frecuentes a nivel mundial (Bonacci y Bojanic, 1991). Su principal singularidad es que experimentan grandes variaciones de caudal sin causa

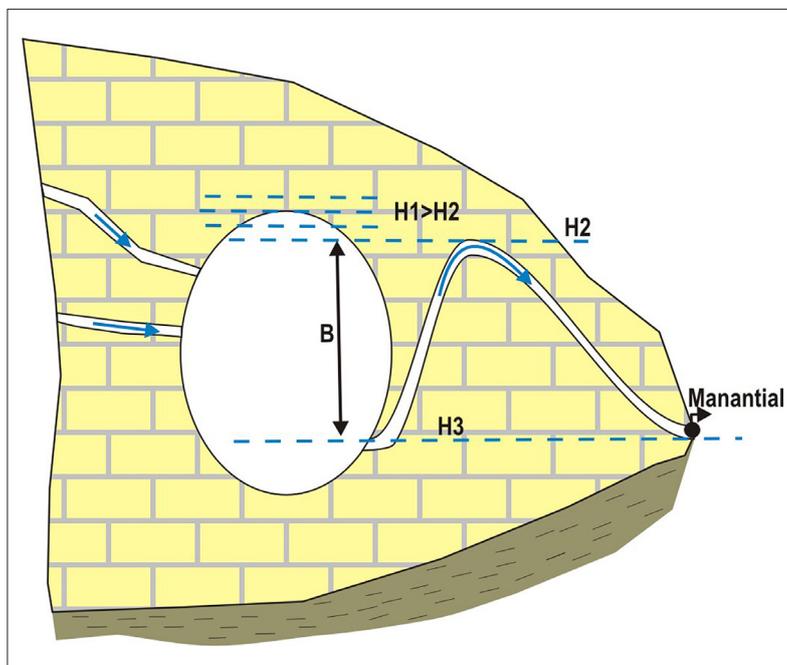
climática. Su funcionamiento está controlado por un proceso de sifonamiento debido a la presencia de un codo o sifón en el interior del acuífero (Fig. 4). Este sifón no necesariamente tiene que estar junto al manantial, puede encontrarse más o menos alejado. Un ejemplo bien conocido de manantial intermitente es el de Fontestorbes (Francia), para el que se propuso un modelo de intermitencia basado en la toma de aire en la parte superior de la cavidad que conectaba la estructura sifonante (Mangin, 1975). Aunque existen excepciones, desde el punto de vista de su aprovechamiento suelen jugar un papel menor por la irregularidad de su caudal.

**Vauclusianas.** Definidas por Trombe en 1952 para caracterizar un comportamiento semejante al que experimenta el manantial de Vaucluse (SE de Francia). Lo que caracteriza verdaderamente a una surgencia vauclusiana es que el agua debe circular bajo carga hidráulica por un conducto vertical en sentido ascendente y canalizar caudales elevados.

**Episódicas o efímeras.** No muestran periodicidad en el caudal, que fluye de forma irregular. Aparecen cuando el acuífero experimenta un notable ascenso de nivel piezométrico a causa de episodios muy lluviosos. Esta entrada de agua en el acuífero origina una saturación transitoria que llega a habilitar conductos normalmente inactivos y situados a mayor cota que el manantial principal. A estos manantiales frecuentemente se les conoce como *trop plein*, que significa “demasiado lleno” en francés, o también *overflow spring* en inglés.

**Inversac.** Son un grupo especial de manantiales cuya principal característica es que el flujo puede funcionar en doble sentido, es decir, el agua puede entrar o salir del acuífero en ese punto según ciertas condiciones hidrodinámicas. Algunas confusiones históricas han hecho que habitualmente en la literatura se las conozca con el nombre de *estavellas* (Geze, 1987). Así, en la región de los Alpes Dináricos suelen denominarse estavellas a dolinas que, bajo situaciones de elevada carga hidráulica en el acuífero, actúan como manantiales, mientras que cuando los niveles se sitúan por debajo de la cota de la surgencia funcionan como sumideros o ponors. Este tipo de estavellas (inversac en realidad) suelen encontrarse en el centro de grandes depresiones kársticas, como los poljes.

**Submarinos (vruljes).** Emergen en grietas y conductos kársticos bajo el nivel del mar. Su existencia se atribuye a la karstificación de muchos macizos carbonatados costeros, como consecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar a lo largo de la historia reciente del planeta. Así, durante el Pleistoceno, como consecuencia de las glaciaciones, la bajada del nivel de mar llegó a ser aproximadamente de 100 m, que se tradujo en un cambio del nivel de base de karstificación en muchos macizos carbonatados y dio origen a nuevos manantiales a cotas muy bajas. Cuando los hielos retrocedieron, y el nivel del mar volvió a subir, estos manantiales quedaron sumergidos pero manteniendo su descarga de agua. Este tipo de manantiales se ha encontrado en numerosas áreas kársticas costeras de todo el mundo: Florida, Yucatán, Cuba, Australia y Japón, entre otros. Pero es en el Mediterráneo donde hay una mayor concentración (Fleury *et al.*, 2007). Se han localizado surgencias situadas has-



ta 50 m de profundidad. La existencia de conductos kársticos, a distintos niveles, provoca diversas mezclas de agua, por lo que estos manantiales presentan una amplia gama de salinidades. En España se han detectado surgencias de este tipo en Málaga, Alicante, Castellón y Cataluña.

**Sublacustres.** Son otro tipo de manantiales subacuáticos, pero en este caso bajo lagos y lagunas. Es posible reconocerlos por burbujeos, diferencias de turbidez, temperatura o contrastes de color en el agua. Su origen es diverso, ya que pueden generarse previamente al lago y ser causantes del mismo o al contrario. Un ejemplo de este tipo de manantiales se encuentra en el lago de Banyoles (Girona).

## EJEMPLOS DE MANANTIALES KÁRSTICOS

A continuación, se exponen algunos ejemplos de manantiales kársticos de la geografía española. Con ellos se trata de mostrar la diversidad de situaciones y comportamientos que presentan este tipo de surgencias.

### La Fuentona de Muriel (Soria)

La Fuentona de Muriel se encuentra en la altiplanicie calcárea de la sierra de Cabrejas. Este relieve, con altitudes de 1000 a 1400 m, se extiende en dirección E-O a lo largo de 60 km, desde las proximidades de Soria capital, hasta la localidad de Cabrejas del Pinar. El manantial fue declarado en 2005 “monumento natural”, con una superficie protegida de 232 ha, que comprende el nacimiento del río Abián, parte de su curso y la cuenca que le rodea.

La Fuentona, también llamado “Ojo de mar”, es único en España, por su gran caudal y por su entorno exterior en forma de anfiteatro kárstico (Fig. 5), con la presencia de varias galerías subaéreas y sumergidas asociadas, que han permitido a una intensa actividad de exploración, por su gran profundidad y por encontrarse inundado en su mayor par-

Fig. 4. Funcionamiento de un manantial intermitente. El manantial está seco cuando el nivel del agua se encuentra entre  $H_3$  y  $H_2$ . Cuando se alcanza el nivel  $H_2$ , se descarga todo el volumen de agua de la cavidad entre  $H_2$  y  $H_3$ . En condiciones de entrada de agua a la cavidad que sitúan el nivel en  $H_1$ , el manantial no mostrará intermitencia sino que funcionará de manera ordinaria (modificado de Bonaci y Bojanic, 1991).



Fig. 5. Vista del manantial de la Fuentona "Ojo de mar", nacimiento del río Abión.

te (requiere técnicas de espeleobuceo). Además, la Fuentona ha sido considerada históricamente, junto con uno de los sabinars más extensos de toda Europa que se encuentra en las inmediaciones, como un paisaje natural de excepcional be-

lleza (Molinero *et al.*, 1999). Atrae a turistas desde los años setenta del pasado siglo, por su entorno singular y por la existencia de un importante coto truchero.

La Fuentona de Muriel pertenece al sistema acuífero mesozoico del borde septentrional de la Cordillera Ibérica, que da origen al río Abión, afluente por la izquierda del río Ucero, que a su vez es tributario del Duero. Este manantial, de funcionamiento típicamente vaclusiano, drena un acuífero kárstico en su mayor parte libre. Nace en una pileta de 30 m de diámetro y 9 m de profundidad, y se sitúa al final de un anfiteatro kárstico. El agua circula por un sifón y varias galerías sumergidas que llegan hasta una profundidad de más de 100 m, con un desarrollo longitudinal de 550 m, cartografiados hasta la fecha.

El acuífero, con una superficie de 124 km<sup>2</sup>, ocupa la mayor parte de la sierra de Cabrejas, que constituye el área de recarga del mismo, y tiene una geometría en sinclinal formado por calizas del Cretácico Superior (250 m de espesor) de alta permeabilidad, apoyadas sobre una base impermeable de margas cretácicas que hacen de barrera natural por el Norte, Este y Oeste y parte del Sur, donde también se encuentra una barrera impermeable de materiales arcillosos terciarios (Fig. 6a). El manantial de La Fuentona brota allí donde este límite impermeable se encuentra a menor cota (1020 m), en las proximidades de la localidad de Muriel de la Fuente.

La recarga es debida principalmente a la infiltración del agua de lluvia y de fusión nival, de forma autóctona y difusa sobre los afloramientos calizos permeables, favorecida por la existencia de una meseta sin drenaje superficial (Fig. 6b). La red de galerías del manantial cuenta con la presencia de sifones activos, tramos de circulación subhorizontal y abandono de sifones superiores debido al descenso del nivel de base del río Abión.

El caudal presenta variaciones entre 50 y 970 L/s, aunque de manera puntual se han obtenido valores superiores a 1 m<sup>3</sup>/s (Fig. 7). La velocidad del

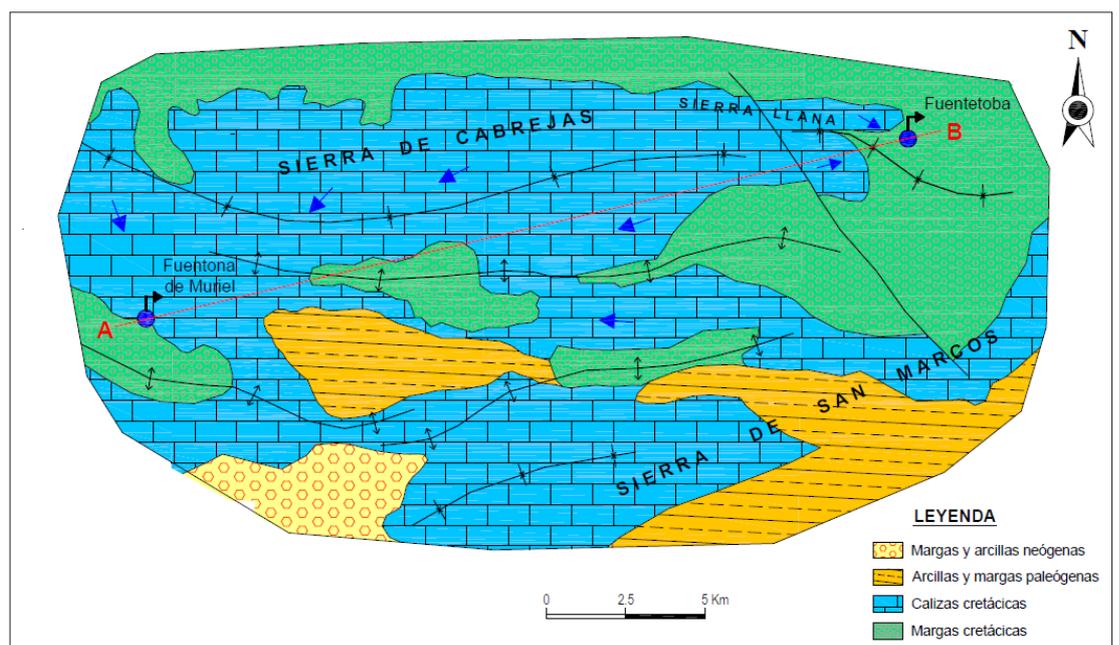


Fig. 6. (a) Esquema hidrogeológico.

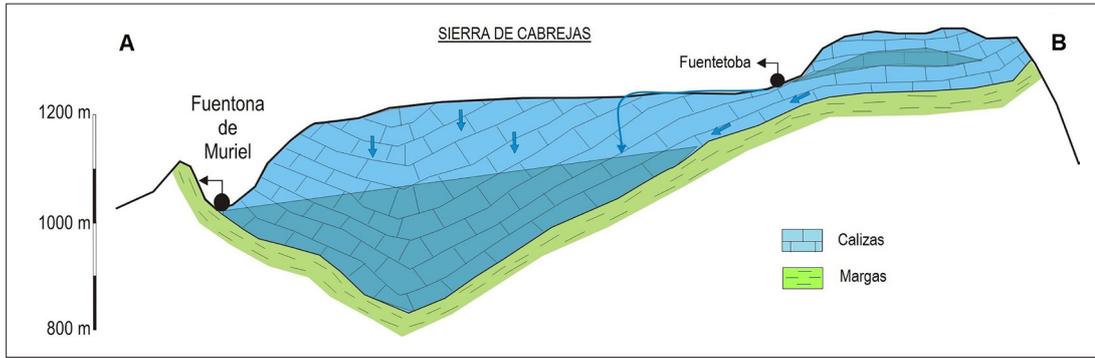


Fig. 6. (b) Corte hidrogeológico en los que se muestra la circulación del agua y la posición de la Fuentona.

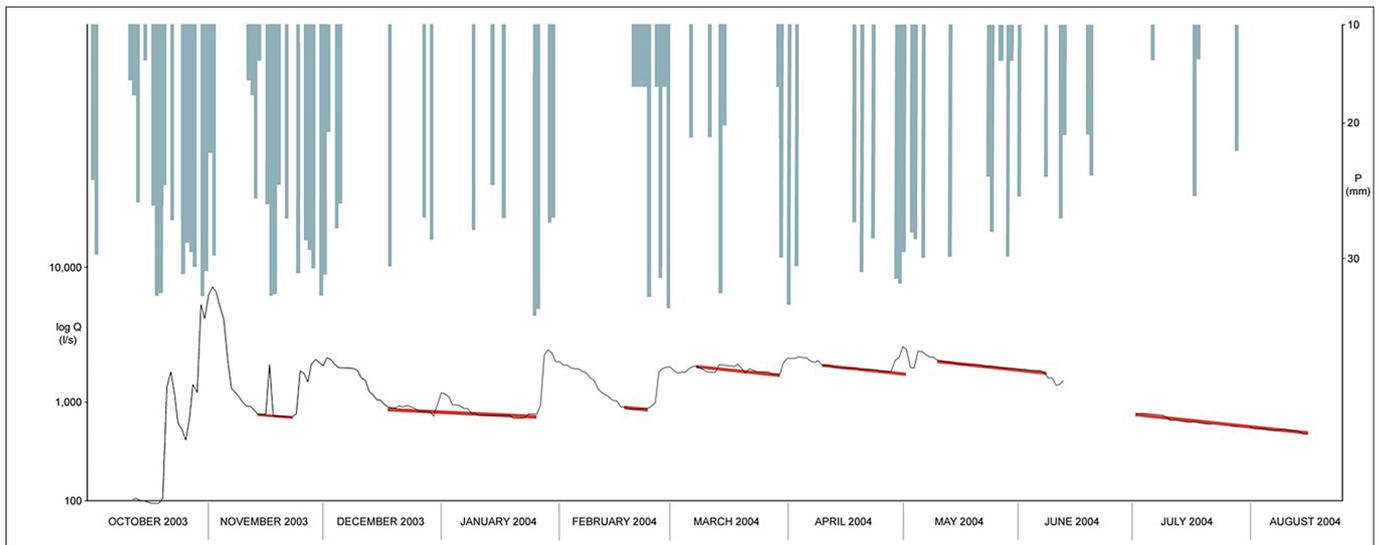


Fig. 7. Hidrograma del manantial de la Fuentona para el periodo octubre 2003/agosto 2004.

agua subterránea establecida mediante pruebas de trazadores, varía entre 500 y 3000 m/día en la proximidad al punto de descarga, dependiendo del régimen hidrológico, lo cual es coherente con un vaciado rápido del acuífero, poca capacidad de almacenamiento y estiajes severos (Pérez y Sanz, 2011). El caudal está muy condicionado por el régimen de precipitaciones. El acuífero tiene poca capacidad de regulación natural, es muy permeable y transmisivo, influenciado por los bombeos y muy vulnerable a la contaminación, sin apenas poder depurador en la zona no saturada.

Debido a la existencia de bombeos para el riego de 150 ha de plantaciones trufas situadas a 12 km del manantial, su funcionamiento natural se ve muy influenciado, especialmente en época de mayor estiaje, cuando la afluencia turística de la zona es más alta, lo que provoca disminuciones importantes del caudal. A fin de compatibilizar esta explotación se utiliza una balsa de almacenamiento y regulación, que se ha propuesto recrear y llenar con agua de pozos de bombeo únicamente durante los períodos de crecida de La Fuentona, con lo que la afección sería relativamente menor y se podría ampliar el grado de explotación del acuífero en concordancia con la capacidad de la balsa. Por otro lado, se ha propuesto la definición de un perímetro de protección, a partir de varias pruebas con trazadores químicos, para preservar la calidad del agua y promover un desarrollo sostenible del acuífero que drena este manantial de excepcional y singular belleza (Pérez, 2007).

### Ses Font Ufanes de Gabellí (Mallorca)

Ses Fonts Ufanes de Gabellí constituyen el conjunto de manantiales más emblemático de las Islas Baleares. Se localizan en la vertiente meridional de la Serra de Tramuntana de Mallorca (Fig. 8), en el término municipal de Campanet, muy cerca de las cuevas turísticas del mismo nombre. Se trata de un conjunto de surgencias de tipo kárstico alineadas a lo largo de una falla, que brotan de forma esporádica invadiendo un tupido encinar (Fig. 9a). El conjunto fue declarado, en agosto de 2001, “monu-

Fig. 8. Localización geográfica y geológica de la Surgencia de Ses Fonts Ufanes de Gabellí.

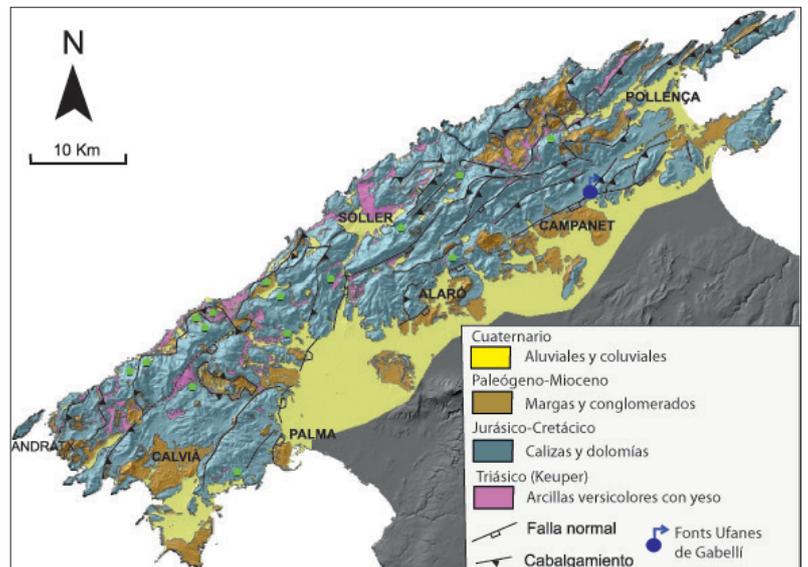




Fig. 9. (a) Surgencia de Ses Fonts Ufanes de Gabellí declarado “monumento natural” en el año 2001, es uno de los espacios naturales más visitados de la isla de Mallorca. (b) Sondeos surgentes construidos con para la regulación del manantial y explotación del acuífero.

mento natural” por el gobierno autonómico de las Islas Baleares.

Los manantiales de Ses Fonts Ufanes de Gabellí permanecen secos durante la mayor parte del año y sólo drenan agua cuando las lluvias en la zona son intensas y continuadas durante varios días. El caudal medio anual del conjunto de fuentes se estima en unos 15 hm<sup>3</sup>/año, con caudales punta de hasta 70 m<sup>3</sup>/s (Cardoso, 1997). La etimología de “Ufanes” hace alusión a su carácter “arrogante” y

“presuntuoso”, ya que cuando brota agua lo hace de una manera brusca y con abundante caudal.

Algunos años secos no drenan agua ni una sola vez, aunque lo habitual es que lo hagan dos o tres veces al año, dependiendo del régimen de precipitaciones (la media en la zona es de 1000 mm/año). Durante el excepcional periodo lluvioso 2008-2010 brotaron hasta en 20 ocasiones.

La geología es clave en el funcionamiento de este conjunto de manantiales, tal y como recoge la figura 10. Existe un acuífero kárstico desarrollado en las rocas calizas del Jurásico Superior, que predominan en la Serra de Tramuntana. Este acuífero es mucho más permeable en su parte alta y superficial, ya que la roca está llena de oquedades y cuevas (las cuevas de Campanet se desarrollan en este tramo). En profundidad, la roca se muestra más compacta, con menor número de fisuras y oquedades, lo que determina una disminución considerable de la permeabilidad. Adicionalmente, existe la denominada falla de Biniatró (Gelabert, 2002), con una longitud aproximada de 2 km. Esta falla pone en contacto los materiales carbonatados del acuífero con unas margas blanquecinas de baja permeabilidad, de edad Jurásico Superior- Cretácico que, en su conjunto, actúan como un acuitardo. Cuando la lluvia es muy continuada e intensa, el nivel freático del acuífero asciende rápidamente, hasta llenarse la zona superior más permeable. Cuando el nivel del agua alcanza la cota de la falla, ésta actúa como vía de drenaje, dando lugar al conjunto de manantiales a lo largo de la misma (Fig. 10, inferior).

Otra curiosidad para los visitantes es una serie de pozos surgentes localizados aguas abajo de las fuentes (Fig. 9b). Estos pozos fueron perforados en los años 80 con la finalidad de investigar el acuífero en profundidad para una posible regulación y explotación. Ambos objetivos no fueron posibles por la propia singularidad del acuífero, ya que en condiciones meteorológicas normales su productividad es muy limitada.

En el año 2005, la administración balear adquirió la finca donde brotan Ses Fonts Ufanes, para uso y disfrute de todos los ciudadanos. Aquellos viejos proyectos que pretendían explotar el acuífero y regular las fuentes quedaron en el olvido. En la actualidad, Ses Fonts Ufanes de Gabellí constituye uno de los espacios naturales más visitados por los mallorquines.

Fig. 10. Esquema simplificado del funcionamiento de Ses Fonts Ufanes de Gabellí. Se trata de una serie de surgencias kársticas que brotan a lo largo de la falla de Biniatró, después de intensas y continuadas lluvias en la zona. El acuífero calizo es mucho más permeable en su zona superior, lo que determina una rápida descarga a través de la falla.

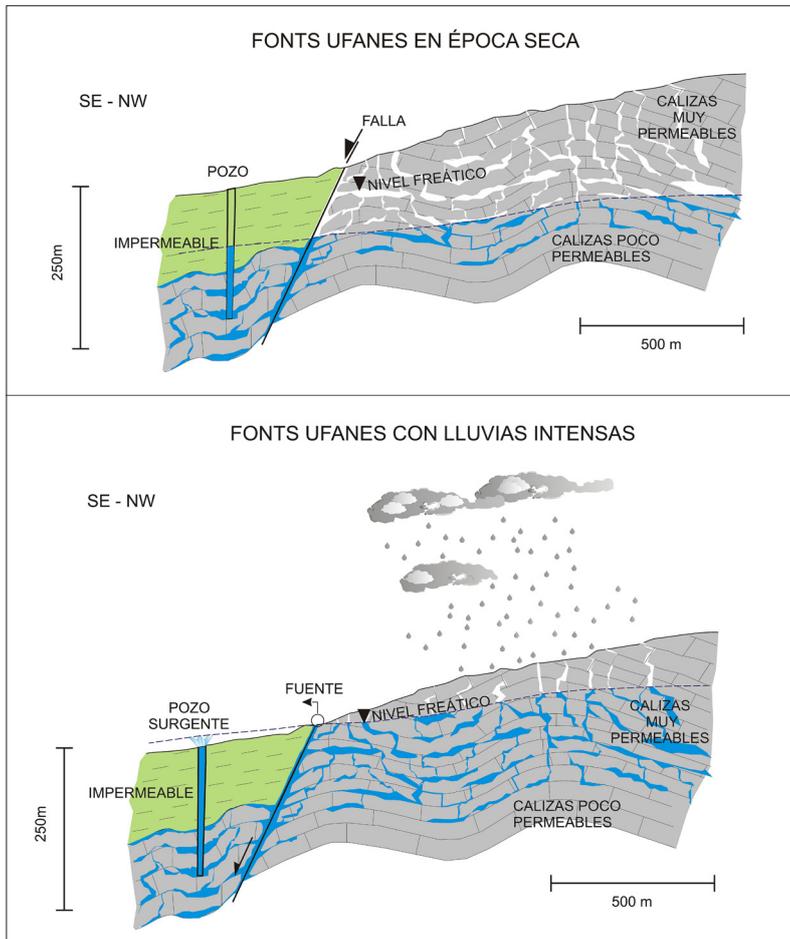




Fig. 11. Localización del sumidero-manantial de Toix en los acantilados del Morro de Toix.

**El sumidero-manantial del Morro de Toix (Alicante)**

El sumidero-manantial de Toix es una cavidad submarina situada en la sierra del Morro de Toix, en la parte Norte del litoral de Altea (Alicante). A lo largo de los acantilados costeros desarrollados en la vertiente meridional de este pequeño relieve se localizan numerosos manantiales submarinos, de los que el denominado sumidero de Toix (DPA, 2007) es el más conocido, debido a que actúa como punto de entrada de agua de mar al acuífero y, eventualmente, como surgencia, es decir, como un inversac.

El sumidero de Toix se desarrolla en las calizas terciarias, aprovechando, en su tramo inicial, una fractura. La cavidad se abre a -8 m de profundidad, en el fondo de una acanaladura con forma de embudo en la base del acantilado (Fig. 11). La boca es circular, con una sección de 1,5 m de diámetro. La enorme dificultad que entraña la exploración de la cavidad sólo ha permitido recorrer sus primeros 150 m. Al final de este tramo se alcanza una profundidad superior a 70 m.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el sumidero-manantial de Toix se considera como un punto singular perteneciente al acuífero kárstico costero denominado Depresión de Benissa (Fig. 12). Este acuífero está formado por una potente serie de calizas cretácicas y terciarias ubicadas entre el Morro de Toix (Altea) y la sierra del Montgó (Jávea), lo que supone una superficie aproximada de 300 km<sup>2</sup>. Estos terrenos carbonatados se

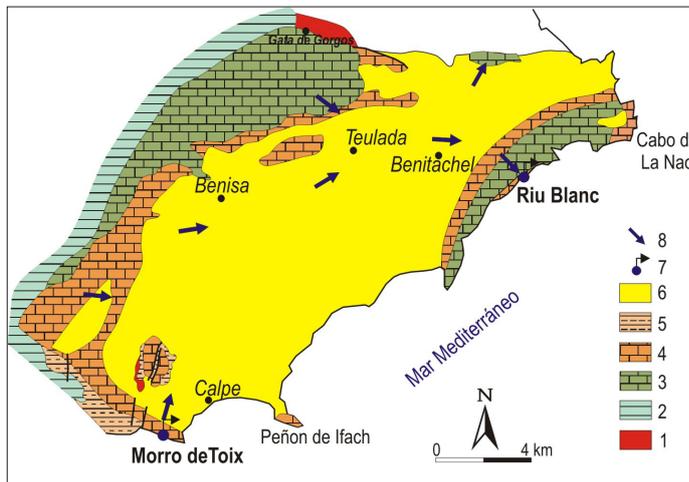


Fig. 12. Esquema hidrogeológico del acuífero Depresión de Benissa. Leyenda: 1. Arcillas y yesos del Keuper; 2. Margas cretácicas; 3. Calizas cretácicas; 4. Calizas oligocenas; 5. Margas eocenas; 6. Margas miocenas; 7. Manantiales; 8. Dirección del flujo subterráneo.

presentan en forma de sinclinal, de ahí la denominación del acuífero. El acuífero se alimenta por los terrenos permeables aflorantes, mayoritariamente en la parte occidental del acuífero, mientras que la descarga tiene lugar por el litoral, siendo el manantial del Moraig o riu Blanc en Benitatxell, situado a nivel del mar, su principal punto de descarga.

El sumidero-manantial del Morro de Toix habitualmente funciona como un dren de alimentación de agua del mar, de manera que se produce una entrada de agua salada hacia el interior del acuífero. En la sección de control de este punto se han llegado a cuantificar caudales de entrada de agua marina superiores a 600 L/s (Fig. 13). Esta situación de recarga se invierte de forma puntual, pasando a funcionar como punto de descarga de agua hacia mar. La inversión de flujo tiene lugar después de episodios lluviosos de cierta magnitud y suele durar varios días. Puntualmente, se han llegado a medir picos de más de 740 L/s, y el agua presenta una salinidad claramente inferior a la del mar, si bien, nunca de agua dulce.

Algunos estudios efectuados en este sistema acuífero, basados en modelos de circulación, han concluido que en el acuífero Depresión de Benissa se origina un proceso de intrusión marina natural. Por el sumidero-manantial de Toix se produce una entrada de agua del mar hacia el acuífero, se mezcla con el agua dulce del mismo, procedente de la infiltración de la lluvia y termina saliendo al mar de nuevo por otros puntos, especialmente el manantial del riu Blanc (Ratsimandresy *et al.*, 2001; Fleury *et al.*, 2008). La influencia de agua marina en este acuí-

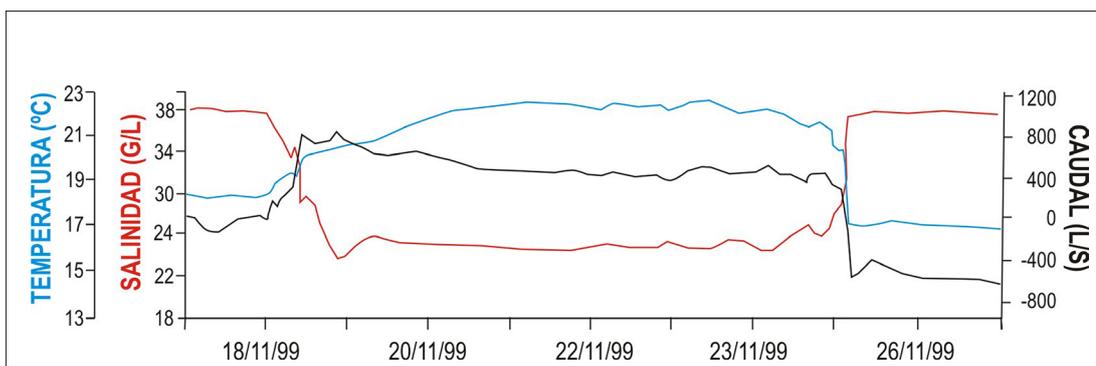
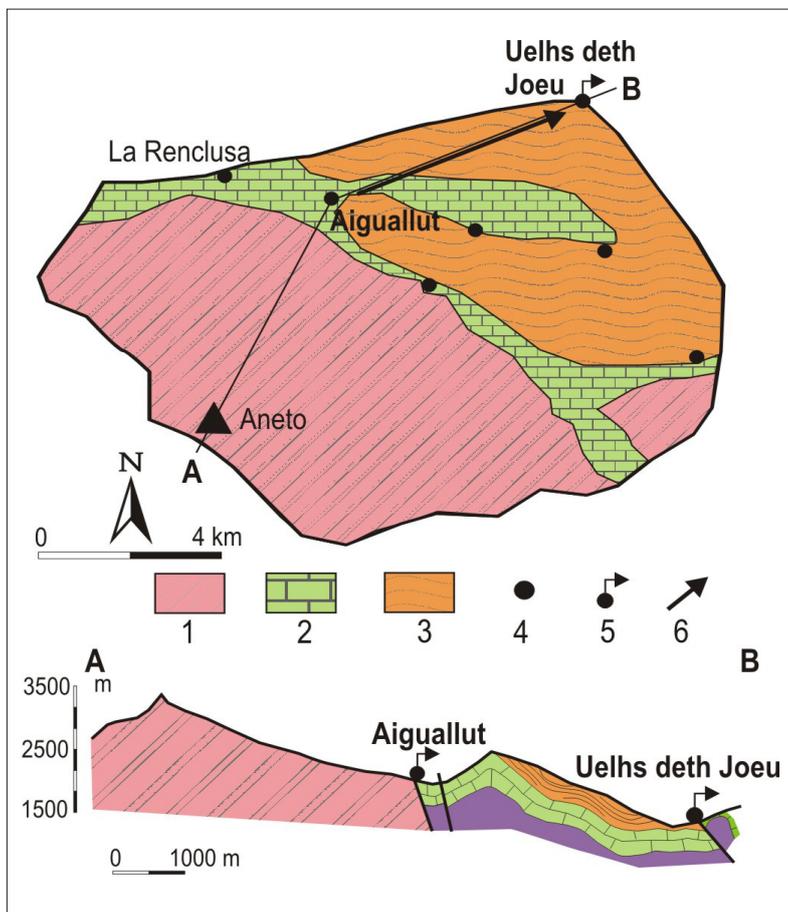


Fig. 13. Comportamiento del caudal, temperatura y salinidad tras un evento de precipitación en la región que provocó la inversión de flujo en el sumidero-manantial del Morro de Toix. Los valores de caudal negativos corresponden a flujos de entrada de agua del mar hacia el interior del acuífero.



Fig. 14. (a) Manantial de Uelhs deth Joeu. (b) Fondo de sumidero de Aiguallut.

Fig. 15. Esquema hidrogeológico del sistema Aiguallut-Uelhs deth Joeu. Leyenda: 1. Granitoides tardihercínicos; 2. Calizas devónicas; 3. Pelitas carboníferas; 4. Sumideros; 5. Manantial; 6. Dirección del flujo subterráneo (modificado de Freixes, 2014).



fero supera la decena de kilómetros hacia el interior, tal y como ha sido puesta de manifiesto por algunos sondeos. Este tipo de circulación ha sido descrito en otros lugares del mundo, de los que el ejemplo de la isla de Cefalonia (Grecia) es uno de los más célebres (Drogue, 1989).

#### Uelhs deth Joeu (Val d'Arán)

El manantial de Uelhs deth Joeu (Fig. 14a), dentro del denominado sistema de Aiguallut-Uelhs deth Joeu, corresponde a unos de los ejemplos más importantes de captura y surgencia kárstica de los

Pirineos, en el que una gran parte de su descarga proviene de la precipitación sobre materiales no kársticos.

Desde un punto de vista topográfico, el alto valle de Benasque, en el confín nororiental de Aragón y con fuertes rasgos glaciares, se encuentra en la vertiente meridional del Pirineo y, por tanto, ha sido considerado como parte de la cuenca del Ebro. Sin embargo, en su cabecera, un gran sumidero, el Forau de Aiguallut (Fig. 14b) situado a 2000 m s.n.m. y con unas dimensiones de unos 70 m de anchura y 40 de profundidad, recoge el agua de los torrentes de los glaciares de Aneto y Barrancs. Aunque algunos autores creían que reaparecía valle abajo, a la altura del Hospital, ya en el siglo XVI los benasqueses sospechaban que el agua se dirigía subterráneamente a la surgencia de Uelhs deth Joeu (1400 m s.n.m.), en un valle lateral del valle de Arán. Así se lo comunicaron a Tiburzio Spanochi, quien lo reflejó en un mapa en 1589, cuando estudiaba para Felipe II la fortificación de la zona. Otros autores se hicieron con la autoría de la idea como Ramond de Carbonnières en 1787. La posible conexión subterránea se hizo polémica a principios del siglo XX cuando se planteó un proyecto hidroeléctrico desviando el agua del sumidero valle abajo. Para resolver esta diferencia, el célebre espeleólogo francés, Norbert Casteret, acompañado por su madre y dos amigas, un arriero y una caballería con 60 kg de fluoresceína, cruzaron clandestinamente la frontera. El colorante, una fortuna entonces y hoy, estaba subvencionada por la *Académie des Sciences*, el *Conseil Général de Haute Garonne* y por el premio Martel, que Casteret acababa de recibir. El 19 de julio de 1931 se vertió la fluoresceína y se comprobó rápidamente la conexión, tras un tramo subterráneo de unos 3,7 km en línea recta. Como EDF, la empresa pública hidroeléctrica de Francia también realizaba proyectos similares en el alto Segre, en la Cerdaña francesa, hubo cierto revuelo diplomático. Un laudo internacional, auspiciado por el rey de Suecia, resolvió en 1957 la situación y se creó una comisión mixta internacional.

Este sistema hidrológico ha sido estudiado en las últimas décadas (Freixes *et al.*, 1999; Monterde, 2002; Freixes, 2014). El tramo subterráneo, hasta ahora impenetrable, se sitúa en calizas y mármoles del Devónico (Fig. 15). Se estima una superficie de

recarga aproximada 35 km<sup>2</sup>, incluyendo el torrente glaciar de Maladetas, que sume en el Forau de La Renclusa. Los picos de caudal en el manantial del Uelh son del orden de 10 m<sup>3</sup>/s. Datos de trazadores muestran tiempos de tránsito diferentes entre los estiajes del invierno, hasta 8 días, y los de la fusión del verano, de unas 16 h (Monterde, 2002; Freixes, 2014).

Excepcionalmente, el sumidero del Forau de Aiguallut es incapaz de asumir toda el agua que accede a éste y se organiza un torrente efímero que desciende valle abajo hasta unirse a la cuenca del Ebro, cruzando la zona del polje de Plan d'Están. El último episodio fue consecuencia de lluvias abundantes sobre un importante manto nival que se produjo en junio de 2013. Hay memoria popular de que un episodio similar se produjo hacia 1916.

Este sistema es un bonito ejemplo de interacción karst y glaciario. En los Pirineos, hubo importantes procesos de karstificación antes del Pleistoceno, de modo que los sistemas de cavidades fueron cortados por la acción excavadora de los glaciares y los torrentes subglaciares drenaban por estos conductos en lugar de fluir bajo el hielo. Además de la conexión Aiguallut-Uelh, del mismo tipo es la conexión sumidero de Gurrundú-Fuentes de Escuaín. Todavía en la actualidad, el torrente subglaciar del glaciar de Monte Perdido, en la cabecera del Cinca, en Pineta, desagua subterráneamente por el karst del Pico de las Olas en el Fuenblanca al valle de Añisclo.

### Fuenmayor (Huesca)

Fuenmayor es una surgencia kárstica en el Prepirineo del Alto Aragón. El manantial está situado entre dos barrios de la pequeña localidad de San Julián de Banzo en el pie del Prepirineo, en el límite del Parque Natural de la Sierra y Cañones de Guara. Históricamente este manantial se usaba para riego de los cercanos huertos. Hasta finales del siglo XIX, la ciudad de Huesca se abastecía de un acuífero aluvial muy próximo a la ciudad, con agua de fuentes como las del Ibón o El Ángel, que se consideraron relacionadas con la epidemia de cólera de 1885. En estas fechas, la iniciativa privada propuso realizar una conducción de 17 km desde Fuenmayor, que se finalizó en 1887 y abasteció en exclusiva Huesca hasta 1950, aunque se produjeron estiajes acusados y restricciones de agua. Hacia 1980, se hizo un sondeo sin éxito en la cabecera del manantial (Fig. 16). En 2005, un bombeo prolongado en otro sondeo, situado a 2 km y realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas, para captar un acuífero próximo más caliente y salino, afectó a Fuenmayor, lo que demostró una conexión hidráulica entre ambos y sugirió la estratificación térmica y química en el segundo acuífero.

El manantial de Fuenmayor aflora justo en el contacto de las calizas del Eoceno con las areniscas y conglomerados del Mioceno en el frente del retrocabalgamiento de San Julián (Fig. 17). La zona de recarga se encuentra sobre esta escama tectónica y la base está formada por los materiales del Trías Keuper (Millán, 1996). Se estima que la zona de recarga tiene una superficie de unos 10 km<sup>2</sup>, en una zona accidentada entre 700 m y 1500 m. No hay cursos de agua importantes, aunque hay un pequeño su-



Fig. 16. La gorga mora donde mana Fuenmayor. En primer lugar, sondeo fallido.

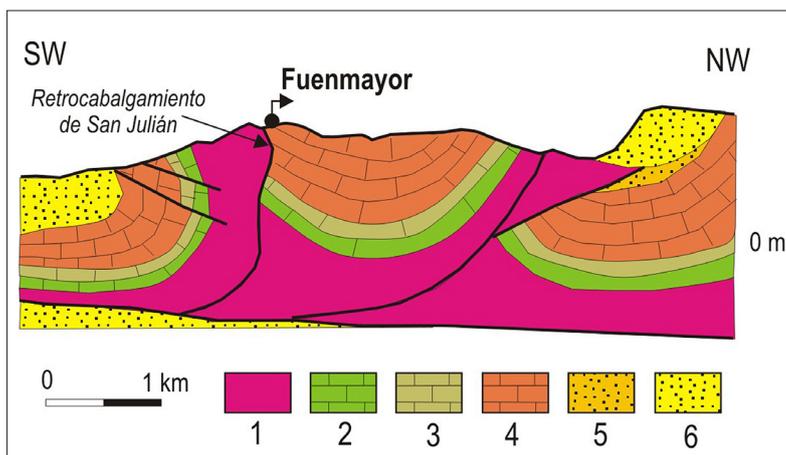
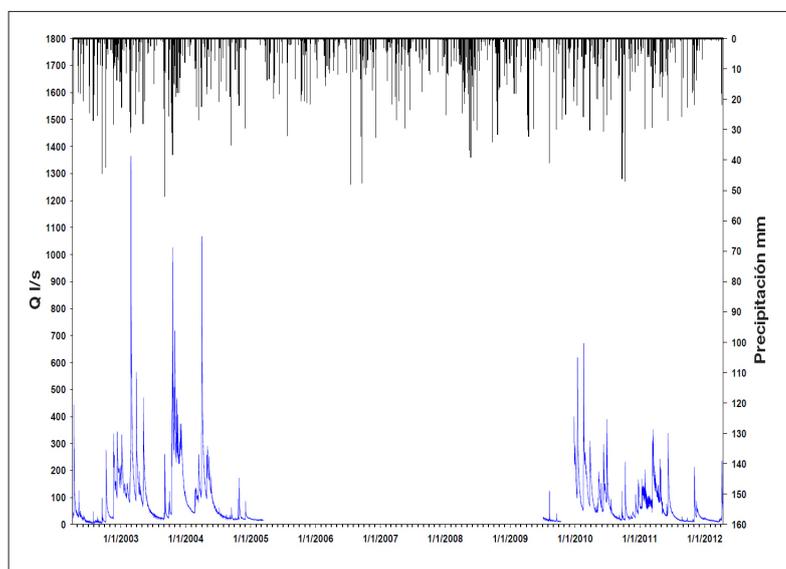


Fig. 17. Corte hidrogeológico en la que se observa la posición del manantial de Fuenmayor. Leyenda: 1. Arcillas Keuper; 2. Calizas cretácicas-1; 3. Calizas cretácicas-2; 4. Calizas eocenas; 5. Areniscas eocenas; 6. Areniscas y conglomerados miocenos (modificado de Millán, 1996).

midero en el barranco Molón (donde se fabricaban muelas de molino). La lluvia anual es del orden de 800 mm. La descarga tiene un desfase de unas 8 h entre el inicio de la lluvia y el comienzo del ascenso del hidrograma. Los caudales varían entre 1500 L/s, en respuesta a fuertes lluvias, y 15 L/s, durante los largos estiajes (Fig. 18). El agua presenta facies hidroquímica bicarbonatada cálcica, con una conductividad eléctrica cercana a 420 µS/cm.

Fig. 18. Relación lluvia-caudal de Fuenmayor entre 2000 y 2012.



### Las surgencias de Torremolinos (Málaga)

La sierra de Mijas constituye un macizo carbonáico de mármoles de edad Trías medio-superior, situado al Suroeste de la ciudad de Málaga. Todo el borde oriental de la sierra está jalonado por una serie de manantiales que, de N a S, son los siguientes: fuente del Rey (Churriana), Rojas, Albercón del Rey, Inca, Pellejera, San José (Fig. 19). Todos ellos se han conocido históricamente como manantiales de Torremolinos (aunque los dos primeros están en el término municipal de Málaga) y constituyen los principales puntos de descarga natural de la mitad oriental de la sierra de Mijas. Los manantiales emergen en el contacto entre los mármoles acuíferos y los materiales margosos de baja permeabilidad, de

Fig. 19. Vista panorámica del borde oriental de la sierra de Mijas en la que se localizaban los manantiales.

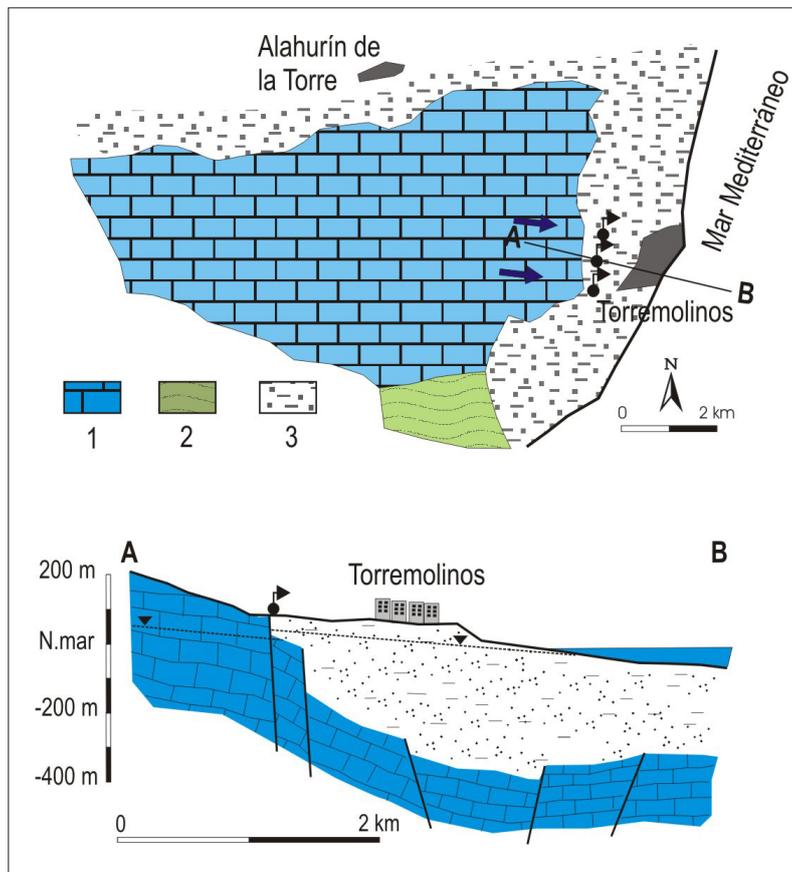


Fig. 20. Esquema y corte hidrogeológico del borde oriental del acuífero de Torremolinos.

edad Plioceno, que afloran en el sector costero (Fig. 20). Estos manantiales constituyeron históricamente los puntos de abastecimiento agua a la ciudad de Málaga, por orden de los Reyes Católicos y de su hija D<sup>a</sup> Juana.

Los mármoles de la sierra están poco karstificados, en superficie y en profundidad, aunque presentan un alto grado de fracturación, lo que permite la acumulación de importantes volúmenes de agua y, además, da lugar a una respuesta lenta, amortiguada, de los caudales de los manantiales frente a las precipitaciones (Andreo, 1996). Por ello, el acuífero de Torremolinos puede catalogarse como acuífero carbonatado fisurado o acuífero de flujo difuso.

El hidrograma total de los manantiales presenta tres periodos claramente diferenciados (Fig. 21): uno primero, cuando los manantiales descargaban en régimen natural, con un caudal medio de 450 L/s; otro en el que hubo una influencia progresivamente creciente de los bombeos (desde 1973 a la década de 1980) y, otro final, en el que los manantiales han estado secos como consecuencia de los bombeos en los numerosos sondeos que existen y sólo han emergido después de lluvias realmente excepcionales (como las de 1989). El análisis detallado de los datos correspondientes al periodo no influenciado ha permitido corroborar que se trata de un sistema muy inercial, que tarda mucho en responder a las precipitaciones y que almacena abundantes reservas de agua. El agotamiento de estos manantiales, como el de todos los de la sierra de Mijas, está unido al crecimiento urbanístico de las poblaciones de su entorno. El acuífero soporta actualmente unas extracciones por bombeos que superan ampliamente los recursos o entradas de agua, lo cual es incompatible con lo que debe ser el aprovechamiento sostenible de un acuífero.

Los abundantes sondeos realizados en el sistema, particularmente en las proximidades de los manantiales de Torremolinos, permiten constatar que, efectivamente, el acuífero no presenta grandes cavidades kársticas en su interior, sino más bien abundantes fracturas agrandadas por disolución, en las que se almacenan importantes reservas de agua que son aprovechadas para abastecimiento urbano. Como consecuencia de la explotación que se está llevando a cabo se producen descensos piezométricos superiores a 10 m/año en algunos puntos. Téngase en cuenta que en el acuífero de Torremolinos se extraen del orden de 10 hm<sup>3</sup>/año más de lo que entra como media anual. Esta situación es netamente diferente de la que existía a mediados del siglo XIX, cuando sólo se utilizaba un tercio del volumen drenado por los manantiales para abastecimiento a Málaga y los dos tercios restantes se aprovechaban para riego.

Las aguas son de una calidad química excelente para abastecimiento urbano y regadío, aunque dicha calidad está seriamente amenazada por las actividades humanas (presiones o peligros) que se desarrollan sobre él. La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación puede considerarse moderada-alta, dado que se trata de un acuífero libre con poco desarrollo del suelo y con una zona saturada formada por mármoles muy fracturados.

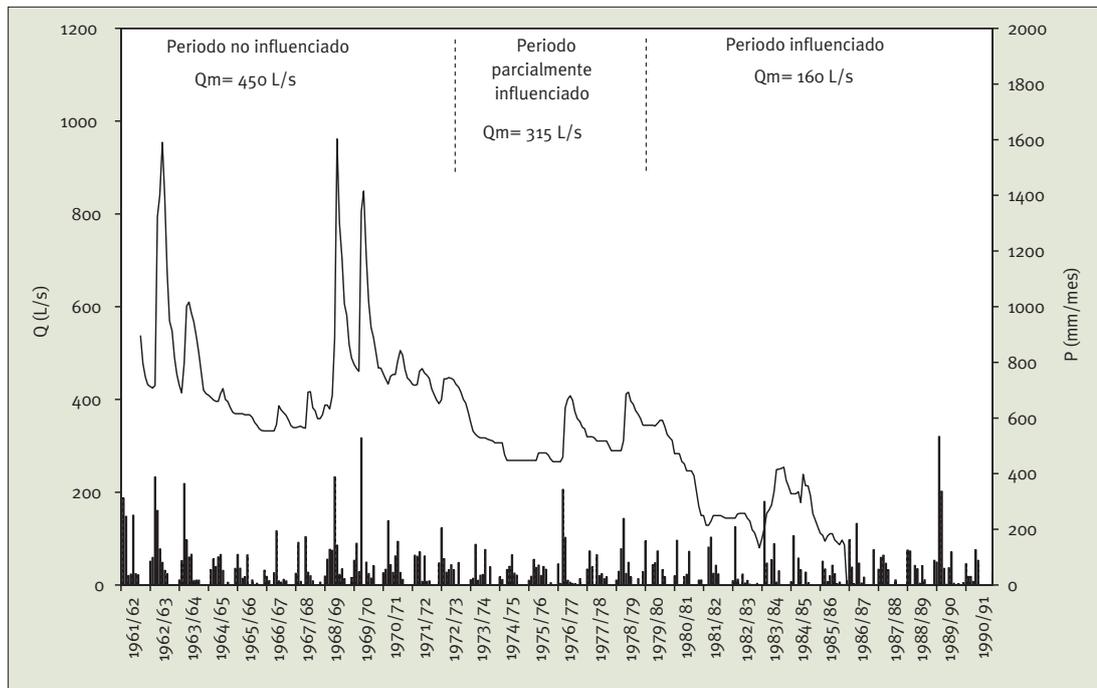


Fig. 21. Evolución histórica del caudal total de los manantiales de Torremolinos.

En el entorno de los manantiales existen antiguos molinos, uno de ellos el de Inca. Hace algunos años, cuando manaba agua por este manantial, se acondicionó el entorno del mismo como área recreativa. Además, en las inmediaciones del recinto de los manantiales existe un pinar que permite disfrutar de una jornada de tiempo libre.

## CONSIDERACIONES FINALES

Existen numerosos manantiales a lo largo y ancho de la geografía española, muchos de ellos de naturaleza kárstica, dado que aproximadamente un tercio del territorio está ocupado por rocas karstificables. Como se ha mostrado en los párrafos precedentes estos manantiales ofrecen una amplia gama de comportamientos y particularidades que los hace especialmente atractivos. Se trata de puntos singulares muchas veces asociados a parajes de gran valor natural, paisajístico, faunístico, botánico etc., que forman parte de nuestro patrimonio hidrogeológico. Muchos de ellos se han secado y otros corren el riesgo de verse afectados, por lo que la sociedad debe tratar de protegerlos y conservarlos, de forma que se pueda seguir disfrutando de ellos.

En los últimos años, se han intensificado notablemente los estudios sobre los acuíferos kársticos, ello ha permitido lograr importantes avances en el conocimiento de estos medios. El estudio de los hidrogramas obtenidos de la descarga de las surgencias, entre otras muchas herramientas metodológicas, ha permitido entender y caracterizar estos acuíferos. Entre las principales características de estos manantiales se encuentran los aumentos de caudal, en algunos casos de forma espectacular, aunque también son frecuentes los que presentan un comportamiento de tipo difuso como los de Torremolinos; otros sólo funcionan ocasionalmente como Ses Ufanes; e incluso algunos muestran dualidad en el sentido del flujo como el sumidero-manantial de Toix; en definitiva, tal

y como se recoge en este trabajo, son manantiales con un amplio espectro de comportamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

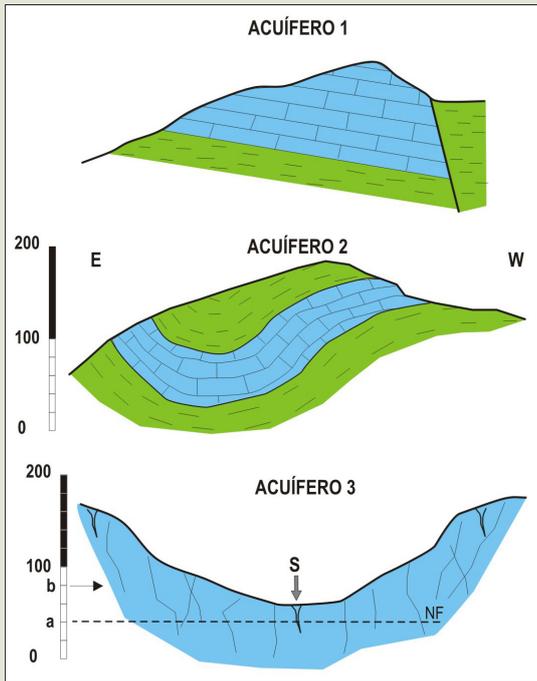
- Andreo, B. (1996). *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España)*. SPUMA-CHS, Málaga, 489 p.
- Antigüedad, I., Morales, T. y Uriarte, J. A. (2007). Los acuíferos kársticos. Casos del País Vasco. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15,3, 325-332.
- Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13,1, 148-160.
- Bonacci, O. y Bojanić, D. (1991). Rhythmic karst springs. *Hydrological Sciences Journal*, 36,1, 35-47.
- Bonacci, O. (1987). *Karst Hydrology. With special reference to the Dinaric Karst*. Springer-Verlag, Berlín, 184 p.
- Bögli, A. (1980). *Karst hydrology and physical speleology*. Springer Science & Business Media, 202 p.
- Cardoso G. (1997). *Comportamiento de los manantiales del karst nororiental de la Serra de Tramuntana, Mallorca*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 452 p.
- Davis, S.N. y De Wiest, R. (1971). *Hidrogeología*. Ed. Ariel. Barcelona, 563 p.
- Drogue, C. (1989) Continuous inflow of seawater and outflow of brackish water in the substratum of the karstic island of Cephalonia, Greece. *Journal of Hydrology*, 106, 147-153
- DPA (2007). Los manantiales provinciales. Segunda parte. Dip. Prov. Alicante, 236 p.
- Fleury, P., Bakalowicz, M. y de Marsily, G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: a review. *Journal of Hydrology*, 339,1, 79-92.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., de Marsily, G. y Cortés, J. M. (2008). Functioning of a coastal karstic system with a submarine outlet, in southern Spain. *Hydrogeology journal*, 16,1, 75-85.
- Ford, D. y Williams, P. D. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons, 576 p.

- Freixes, A. (2014) "Els aqüífers càrstics dels Pirineus de Catalunya. Interès estratègic i sostenibilitat". Tesis doctoral. Universidad de Barcelona, 650 p.
- Freixes, A., Ramoneda, J. y Ramoneda, J. y Monterde, M. (1999) Les apports hydriques souterrains de la Garonne au Val d'Aran (Catalogne). Le système karstique de Joëu. *Revue de Comminges*, 115.2, 295-313.
- Gelabert B. (2002). Las Fonts Ufanes (Mallorca): funcionamiento hidráulico de una surgencia kárstica. *Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del karst*, 3, 46-55.
- Geze, B. (1987). Les mésaventures des sources de l'Estavelle et de l'Inversac en Languedoc Méditerranéenn. *International Journal of Spelology*, 16.3, 101-109.
- Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J. y Weiler, M. (2014). Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Reviews of Geophysics*, 52.3, 218-242.
- Kiraly, L. (1971). Groundwater flow in heterogeneous, anisotropic fractured media: A simple two-dimensional electric analog. *Journal of Hydrology*, 12.3, 255-261.
- Llopis, N. (1970). *Fundamentos de hidrogeología cársica (introducción a la espeleología)*. Ed. Blume, Madrid, 269 p.
- Mangin, A. (1975) *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Tesis Doctoral. In Annales de Spéléologie 29.3, 283-332; 29.4, 495-601; 30.1, 21-124.
- Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67.1, 25-43.
- Meinzer, O. E. (1923). *Outline of ground-water hydrology, with definitions* (No. 494). US Gov. Print. Off.
- Milanovic, P.T. (2004). *Water resources engineering in karst*. CRC Press. Boca Ratón, 328 p.
- Millán, H. (1996). *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico de las Sierras Exteriores Aragonesas*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 330 p.
- Molinero, F., Menesses, J.M. y Sanz, E. (1999). La Fuentona de Muriel (Soria). Monumento Natural. *Jornadas sobre el Patrimonio Geológico y Desarrollo Sostenible*. Ministerio de Medio Ambiente. Serie Monografías, 93-94.
- Monterde, M. (2002). El sistema kárstico del Uelhs deth Joèu. El sistema kárstico de Uelhs Deth Joèu. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 52, 233-244.
- Pérez, J.J. (2007). *Hidrogeología del sistema kárstico de la Fuentona de Muriel (Soria)*. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid, 279 p.
- Pérez, J. J. y Sanz, E. (2011). Hydrodynamic characteristics and sustainable use of a karst aquifer of high environmental value in the Cabrejas range (Soria, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 62.3, 467-479.
- Pitts, M. W. y Alfaro, C. (2001). Geologic/hydrogeologic setting and classification of springs. In *Springs and Bottled Waters of the World* Springer Berlin Heidelberg, 33-71.
- Pulido-Bosch, Antonio, Vallejos, A. y Sola F. (2016). Breve síntesis de las investigaciones hidrogeológicas en el karst: de Cvijic y Martel a la actualidad. *Enseñanza de Ciencias de la Tierra*, 24.1, 21-27
- Ratsimandresy, A., Cortés J.M., Ferrer, L., Menvielle, Antoranz, A., Serrano, V. y Mateu, J. (2003). Intrusión marina en el sistema de cuevas Toix-Moraig: procesos físicos. Sedek. *Boletín de la Sociedad Espeleología y Ciencias del karst*, 4, 66-49.
- Smart, C. y Worthinton R.H. (2004). Springs. En: *Encyclopedia of caves and karst science*. (Ed: J. Gunn). Taylor and Francis, 960 p.
- Sweeting, M. (1972). *Karst landforms*. Columbia. Ed. Longman. Londres, 362 p.
- White, W.B (2004). Springs. En: *Encyclopedia of caves*. (Eds.: D.C. Culver y W. B. White). Elsevier, 645 p. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 10 de octubre de 2015 y aceptado definitivamente para su publicación el 25 de enero de 2016*

## ACTIVIDADES PARA EL AULA

A continuación, se incluyen unas pequeñas actividades de apoyo y complemento a las explicaciones teóricas sobre manantiales kársticos. **Soluciones en la versión digital.**

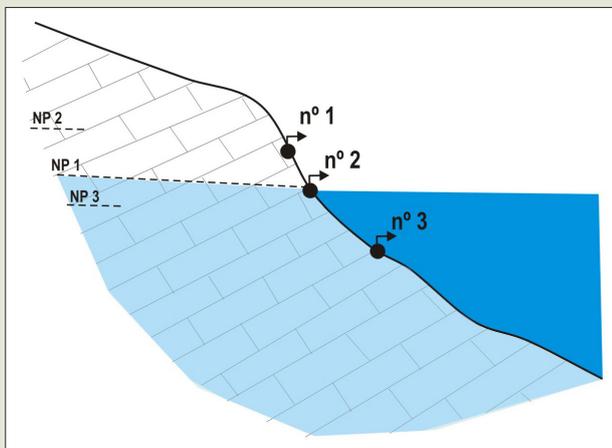


**Actividad 1.** Observa los siguientes esquemas geológicos y responde a las siguientes cuestiones.

- ACUÍFERO 1. Dibuja dónde se situaría el manantial del acuífero kárstico
- ACUÍFERO 2. ¿Dónde crees que se situaría el manantial? ¿A qué altura mínima tendría que subir el nivel freático para que también drenase por la parte Oeste? Utiliza la escala del dibujo
- ACUÍFERO 3. Bajo esta situación hidrodinámica (nivel freático en a) ¿Cómo actuaría el punto S? ¿Cómo funcionaría si el nivel freático subiese a una altura de 40 m (posición b)? ¿Cómo se llaman este tipo de manantiales?

**Actividad 2.** La tabla II recoge los valores de caudal y tiempo de 3 manantiales (M-1, M-2, M-3). Dibuja los hidrogramas y ordena los manantiales en función del grado de karstificación. Razona la respuesta.

| MANANTIAL T (DÍAS) | M-L Q(L/s) | M-2 QU/s) | M-3 QU/s) |
|--------------------|------------|-----------|-----------|
| 1                  | 7,8        | 3,9       | 8         |
| 2                  | 9,5        | 4,75      | 8         |
| 3                  | 17,6       | 7,8       | 10        |
| 4                  | 42         | 11        | 45,8      |
| 5                  | 55,6       | 13        | 79,5      |
| 6                  | 51,6       | 14,8      | 50        |
| 7                  | 40,8       | 16        | 21        |
| 8                  | 31,2       | 15,6      | 12,5      |
| 9                  | 25,2       | 14        | 11,5      |
| 10                 | 21,3       | 12,4      | 10,8      |
| 11                 | 16,9       | 10        | 10        |
| 12                 | 14,1       | 8,4       | 9,3       |
| 13                 | 12,2       | 7         | 8,9       |
| 14                 | 10,8       | 6,5       | 8,4       |
| 15                 | 9,8        | 6,1       | 8         |



**Actividad 3.** Observa el esquema del acuífero kárstico costero e indica qué manantiales están activos con un nivel freático (NP 1) y cuáles están secos. Nombra los tipos de manantiales. Imagina que se produce una lluvia y eleva el nivel freático a NP 2, ¿cuáles estarían activos? Imagina ahora que el nivel del agua baja y se sitúa a la altura NP 3, ¿cómo crees que funcionaría el manantial n° 3? Razona la respuesta.