

# El patrimonio hidráulico del sistema de galerías de Zucaña (Almansa-SE España) y sus condicionantes geológicos e hidrogeológicos

Bruno J. Ballesteros Navarro<sup>(1)</sup>, Miguel Antequera Fernández<sup>(2)</sup>, Antonio González Ramón<sup>(3)</sup> y Sergio Martos Rosillo<sup>(3)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Unidad Territorial de Valencia. C/Cirilo Amorós, 42, 46004 Valencia, España.

(2) Departamento de Geografía, Universitat de València. Avda. Blasco Ibañez, 28. 46010 Valencia, España.

(3) Instituto Geológico y Minero de España, Unidad Territorial de Granada.

Urb. Alcázar del Genil, 4-Edif. Zulema, 18006 Granada, España

b.ballesteros@igme.es; miguel.antequera@uv.es; s.martos@igme.es; antonio.gonzalez@igme.es

## RESUMEN

Las galerías drenantes, o *qanats* según su acepción más internacional, son elementos singulares de captación de agua por su concepción técnica, su arquitectura y, especialmente, por su valor arqueológico, al tratarse de una de las técnicas de aprovechamiento de recursos hídricos más antiguas, ya que su origen se remonta a los albores de la civilización mesopotámica. Aunque con una implantación más tardía, este tipo de captaciones son muy numerosas en España donde son utilizadas con profusión en las zonas de mayor aridez. Además de los valores mencionados, existen otros aspectos de innegable significado e importancia relacionados con ellas, tales como el origen de sus recursos hídricos y los condicionantes geológicos e hidrogeológicos a los que se encuentran sometidas. Con este enfoque pluridisciplinar, en este artículo se abordan ambas materias para la denominada Mina de Aguas de Zucaña, ubicada en la región suroriental de España. Se trata de un minado medieval de origen árabe compuesto por múltiples ramificaciones que drenan 10 surgencias subterráneas, con un caudal conjunto entre 18 y 25 l/s, e integrado por otras tantas galerías con una longitud total de 1.625 m y una treintena de lumbreras. Este dispositivo constituye el principal punto de drenaje del acuífero de Zucaña, sistema independiente y suprayacente a otras estructuras hidrogeológicas de la zona. En sucesivos apartados, además de describir los aspectos constructivos e históricos del minado, se analizan las características geológicas y el funcionamiento hidrodinámico del acuífero al que drena, así como su balance hídrico y las propiedades hidroquímicas de sus aguas, aspectos que contribuyen a establecer los criterios para la salvaguarda y protección de sus recursos hídricos.

Palabras clave: Galerías drenantes, hidrogeología, patrimonio hidráulico, Zucaña, Almansa.

## ***The hydraulic heritage of the gallery system of Zucaña (Almansa-SE España) and its geological and hydrogeological conditions***

### ABSTRACT

*The draining galleries, or "qanats" according to their most international meaning, are unique elements of water collection due to their technical conception, their architecture and, especially, for their archaeological value, since they are one of the oldest water resource exploitation techniques with an origin that goes back to the dawn of the Mesopotamian civilization. Although with a later implantation, these types of captures are very numerous in Spain where they are widely used in the arid and semi-arid zones. In addition to the above mentioned values, there are other aspects of undeniable significance and importance related to them, such as the origin of their water resources and the geological and hydro-geological conditions to which they are subject. With this multi-disciplinary approach, both subjects are addressed in this article for the so-called Water Mine of Zucaña located in southeastern Spain. It is a medieval mine of Arabic origin composed of multiple ramifications that drain 10 underground springs with a joint flow of between 18 and 25 l / s, integrated by as many galleries with a total length of 1,625 m and about thirty luminaries. This device constitutes the main drainage point of the Zucaña aquifer, an independent system and overlying other hydro-geological structures in the area. In successive sections, in addition to describing the constructive and historical aspects of the mine, the geological characteristics, hydrodynamic functioning and hydric balance of the aquifer to which it drains are analyzed, as well as the hydro-chemical properties of its waters, the main aspects to establish the criteria that will allow the safeguard and protection of its water resources.*

**Keywords:** hydraulic heritage, hydrogeology, "qanats", Zucaña, Almansa.

## Introducción

Dentro del patrimonio cultural y arquitectónico, las obras hidráulicas constituyen un capítulo de indudable interés en el que los estudios elaborados sobre ellas, a pesar de reconocer su total relación con los recursos hídricos, se centran casi con exclusividad en la descripción de sus elementos constructivos y, en ciertos casos, en el análisis de los usos y formas de aprovechamiento y regulación de sus aguas, bien para el abastecimiento a poblaciones o para regadío. En consecuencia, aspectos de innegable significado e importancia, tales como el origen y procedencia de los propios recursos hídricos, así como la comprensión del porqué de la existencia de los caudales drenados, quedan con frecuencia obviados y olvidados. Estos conocimientos son necesarios y decisivos para poder discernir sobre las posibles pérdidas de caudal de estas obras a lo largo del tiempo y/o proceder a su protección, evitando su desaparición, e, incluso, intentar su recuperación si así se requiriese. Con este enfoque pluridisciplinar, en este artículo se describen y analizan tanto los aspectos arqueológicos e históricos, como los geológicos e hidrogeológicos de la denominada Mina o Minado de Aguas de Zucaña, sistema de galerías drenantes de origen árabe ubicado en las cercanías de Almansa, localidad de la provincia de Albacete en la región suroriental de España (Figura 1). Este sistema de captación de agua presenta una elevada complejidad, ya que consta de numerosas bifurcaciones que confluyen en una bocamina situada a unos 4 km al sur del núcleo urbano de Almansa a una cota de

784 m s.n.m. Los diversos ramales y estructuras, construidos de forma progresiva a lo largo de un extenso periodo de tiempo, se prolongan hasta casi 1 km más hacia el sur, con un punto inicial de drenaje en torno a 810 m s.n.m.

El interés arqueológico, histórico y social de estas obras es bien patente, ya que su origen está indudablemente ligado a los primeros asentamientos humanos en la región y, especialmente, a la población de Almansa. De ahí el valor que adquiere su conservación y preservación para las generaciones futuras, asunto en el que el conocimiento de los condicionantes geológicos e hidrogeológicos a los que se encuentran sometidas sus aguas es determinante.

## Las galerías drenantes. Origen y elementos estructurales

En el ámbito del patrimonio hidráulico existen sistemas de captación de recursos hídricos que por su antigüedad, concepción técnica y arquitectura son especialmente singulares, tal sucede con las galerías drenantes, conjuntos culturales frecuentemente desconocidos y escasamente valorados. Se trata de perforaciones horizontales excavadas en el subsuelo que generan unidades identificadas como paisajes del agua, con un gran significado en los espacios áridos y semiáridos. Es el caso del Sureste español, donde la escasez de cursos superficiales permanentes obliga a la búsqueda de aguas subterráneas.

La acepción más común que poseen las galerías drenantes en la bibliografía internacional es la de *qanat*, aunque adquieren múltiples denominaciones según su espacio geográfico (*foggara* en Argelia, *kariz* o *karez* en Irán, *khettara* en Marruecos, *mina* o *minado* en España, *puquio* en Perú, etc.). Este es un sistema de captación de agua subterránea con varios milenios de antigüedad que propone un uso equilibrado y racional de los recursos hídricos disponibles y que posee un destacado valor patrimonial.

La técnica de construcción de *qanats* tuvo su origen en la zona caucásico-persa, como señalan Barón y Carbonero (1987), probablemente en Armenia o Irán. Para English (1968) nace entre Armenia y el noroeste de Persia, y se propaga hacia el sudoeste asiático y el norte de África durante el periodo aqueménide (550-531 a.C.). Goblot (1979) y Beaumont (1989) señalan que surgieron en Persia alrededor del año 3000 a.C., mientras que Oliver Asín (1958) y Troll y Braun (1974) afirman que ya existían galerías armenias construidas entre los siglos IX y VI a.C. durante la civilización caldea. La más antigua datada se encuentra al norte de Irán y es de hace 3000 años (Javan *et al.*, 2006), mientras que la primera referencia escrita sobre ellas aparece en el año 714 a.C. en la transcripción de una



**Figura 1.** Situación geográfica del sistema de galerías de Zucaña en las proximidades de Almansa (Albacete) en el SE de España, y delimitación del acuífero al que drenan. Base topográfica del Instituto Geográfico Nacional.

**Figure 1.** Geographic situation of the Zucaña gallery system in the vicinity of Almansa (Albacete) in the SE of Spain, and delimitation of the aquifer to which they drain. Topographical base of the National Geographic Institute.

escritura cuneiforme sobre la octava campaña del rey asirio Sargón II contra el rey Urartu, donde describe el sistema de *qanats* cercano a la ciudad de Uhlu, la actual Marand, ubicada también al norte del Irán.

El único tratado medieval sobre galerías que se conserva es el publicado en Ispahán (antigua Persia) por el matemático persa Al Karagi en el año 1017. En la actualidad son numerosos los estudios de los *qanats* iraníes, lugar en el que, como se ha comentado, probablemente surgió esta particular técnica de aprovechamiento de recursos hídricos, donde existen unos 34.000 según las estimaciones de Semsar-Yazdi y Khaneiki (2012).

El sistema de captación de las galerías drenantes tiene una mayor complejidad que otras formas de obtención de agua a causa de sus particulares características constructivas y de las dificultades que plantea su diseño. La construcción de una galería horizontal supone el conocimiento de técnicas complejas y constituye una solución ingeniosa que permite obtener agua subterránea mediante la fuerza de la gravedad. En su diseño y ejecución, la determinación de la pendiente para conseguir el afloramiento del recurso a la superficie es el principal factor, por lo que los procedimientos y los instrumentos de nivelación, junto con la pericia y experiencia de los ingenieros y constructores, son fundamentales para que la excavación tenga éxito (Antequera, 2015).

Los elementos fundamentales de las galerías drenantes son:

a) El túnel horizontal, mediante el que se accede al nivel freático y permite drenar el agua al exterior.

b) El pozo madre, o conducto vertical excavado desde la superficie donde existen indicios de aguas subterráneas. Este elemento, sin embargo, no es imprescindible, ya que no todas lo tienen, como sucede con las tipologías de minas y de zanjas.

c) Las lumbreras, o respiraderos verticales que conectan la superficie con la galería. Por lo general suelen estar situadas a intervalos regulares. Tampoco las minas y zanjas las poseen.

d) La acequia interior excavada en la solera del túnel, que puede situarse en el centro o en los laterales.

e) Los mechinales o troneras, que son orificios situados en los hastiales del minado para facilitar el acceso del agua a la galería.

f) La bocamina, o lugar por donde el caudal captado aflora en superficie, que puede o no permitir el acceso al interior.

El primer paso en la construcción de un *qanat* consiste, normalmente, en la elección del lugar donde perforar el pozo madre. Cuando se alcanza el nivel freático se determina el punto en el que debe ubicarse la bocamina teniendo en cuenta la pendiente para que el agua derive al exterior por gravedad. Una vez ubicada la bo-

camina comienza desde ella la excavación hasta llegar al pozo madre. En su trazado se abren lumbreras o pozos de aireación para facilitar la evacuación del material removido, agilizar el acceso de los obreros y las herramientas a su interior, y garantizar la ventilación y la entrada de luz. Como señalan Semsar Yazdi y Khaneiki (2010), las lumbreras permiten acortar el tiempo necesario para la construcción o reparación de la galería, lo que reduce gastos. Tampoco es infrecuente que la excavación se inicie a partir de una surgencia ya existente, con el objetivo de incrementar su caudal, de modo que el proceso seguido sería en este caso el inverso.

Las galerías drenantes poseen un amplio abanico tipológico, lo que las dota de un gran valor ambiental y cultural (Barceló y Carbonero, 1986). No existe una arquitectura común para ellas, ni una única técnica constructiva, ya que su diseño se adapta a las necesidades concretas de cada lugar en función de la litología, el contexto hidrogeológico, la topografía, la climatología, etc. La clasificación tipológica se puede articular en tres criterios (Antequera, 2015):

1- El origen de las aguas captadas: que por el tipo de acuífero al que drenan pueden ser subterráneas profundas, subálveas y detríticas cuaternarias, o la combinación de ambas.

2- Características constructivas y funcionales: según el modo de excavación y la solución técnica empleada para la obtención de caudal.

3- El ambiente geográfico: por las características topográficas y geológicas del territorio donde se encuentran, las galerías pueden situarse en ambientes de montaña (laderas y plataformas), intermedios o de transición (pedemontes, glaciares y conos de deyección) y en cursos y terrazas fluviales (cauces y terrazas, vauadas y barrancos).

## **El minado de Zucaña**

### **Antecedentes**

Existen varios antecedentes bibliográficos sobre la Mina o Minado de Aguas de Zucaña. El Archivo Histórico Municipal de Almansa (AHMAL en adelante) contiene numerosos legajos con información sobre la captación. Varias fuentes históricas nombran la galería y enumeran los usos del agua extraída, como el regadío o los molinos harineros. Es el caso de Catastro de Ensenada (1755), las Relaciones de Tomás López (1786-1789) y el Diccionario geográfico-estadístico-histórico de Pascual Madoz (1845-1850). El acta de notoriedad de 1952 y las Ordenanzas de la Comunidad de Regantes aprobadas en 1963 también constituyen valiosos documentos para conocer las características y el funcionamiento del minado, así como el uso de sus aguas

para regadío y abastecimiento. Varios investigadores locales han realizado estudios sobre esta galería y su sistema asociado. Entre otros destacan los trabajos de Gómez Cortés y García Sáez (1987), Gil López (2009) y Pereda Hernández (2009). El equipo de investigación ESTEPA, dirigido por el profesor Jorge Hermosilla, del Departamento Geografía de la Universidad de Valencia, también analiza este minado y su sistema (Hermosilla, 2012). Finalmente, en la tesis doctoral de Miguel Antequera (2015) se realiza un estudio pormenorizado del mismo y en Martos-Rosillo et al. (2018) se hace un resumen de sus principales características.

### **Aspectos históricos**

No se conoce con exactitud cuando comenzaron a ser utilizadas las aguas de la surgencia de Zucaña, aunque parecen haberse empleado para abastecimiento humano y regadío desde la fundación de la ciudad de Almansa. Una hipótesis probable es que la galería fuera diseñada por los musulmanes. El topónimo árabe *Zuc-ayna* así lo parece indicar. No obstante, el entramado actual de túneles y acequias podría haberse desarrollado durante un periodo de varios siglos (Piqueras, 2012). Existe constancia de la explotación de estas aguas desde la aprobación de las primeras Ordenanzas, escritas el 1 de febrero de 1531. El historiador Juan Miguel Pereda-Hernández (2010) indica que en la segunda mitad del siglo XVI debieron excavar algunas de ellas, pues en los acuerdos municipales de la época son frecuentes los contratos aprobados por el Concejo para su construcción o ampliación. La descripción más antigua conservada de las aguas de Zucaña es la del zahorí o "agüero" llamado Baltasar Juan, vecino de Elche que se autodenominaba "... maestro y conoçedor de los lugares donde ay agua, segund que Dios le a ministrado...", quien se presentó ante el Concejo de Almansa el 7 de abril de 1561. La descripción del terreno de las fuentes y de la ribera de Zucaña está registrado en el informe de Pereda Hernández (2010). El municipio y Baltasar Juan firmaron un contrato por el que éste se ofrecía a doblar el caudal en un plazo de cuatro meses, a cambio de 560 ducados. El 8 de julio de 1566 el concejo realizó un nuevo contrato con el maestro Juanes de Segura para cubrir la acequia destinada al abastecimiento de agua potable en su recorrido hasta Almansa, obra por la que se le pagarían 400 ducados.

Aparte de los documentos del siglo XVI, las noticias concretas sobre las galerías y su origen, o del periodo histórico en el que fueron construidas o ampliadas, son escasas. Es factible que su edificación fuera posterior a esa fecha, para poder maximizar los caudales de las aguas de Zucaña, y la de otros

manantiales próximos, como La Mearrera y los de la rambla de los Molinos. Las nuevas Ordenanzas, que sustituyeron a las de 1531, se aprobaron el 28 de octubre de 1625. El manuscrito se localiza en el AHMAL (Legajo 1428, Exp. 4), e indica que se han de respetar las regulaciones antiguas, con las tandas establecidas anteriormente. También ordena la confección de un plano con la huerta regada y la superficie de tierra que posee cada banal.

Las Respuestas Generales del Marqués de Ensenada (1755) contabilizaron 9 molinos harineros sobre la acequia de Zucaña, varios de la familia Henríquez de Navarra. En la relación remitida en 1785 a Tomás López por el secretario Antonio Romero, éste describe la fuente situada en el sitio de Zucaña, a una legua al sur de Almansa, del siguiente modo: "... de una roca o peña sale y mana una christalina fuente que llaman de la Plata, cuyas delicadas y sutiles aguas pasan al parecer de hidráulicos por las mejores de España" (López, 1786-1789).

La "*Memoria de las Fuentes y Cauces de Zucaña y sus trabajos hechos en 1897 al 1898*" fue redactada por la Sociedad de Aguas de Zucaña, a consecuencia del mal estado de alguna de las captaciones y del sistema. Se conserva en el archivo familiar de la Casa de los Henríquez de Navarra de Almansa. La transcripción la realiza Pereda Hernández (2010), del que Piqueras (2012) extrae algunos párrafos: "*Nos encontramos completamente derruida y casi hundida la fuente denominada La Plata, con grandes peñascos derrumbados en mitad de su cauce, esta mina tenía 35 metros de larga*"... "*Se la hizo un rebaje desde su boca, igualmente que un cauce de piedra sillería, emplazando las paredes con sólida base y herméticamente unidas al techo, habiéndose alargado 15 metros nuevos de minado con lo cual se consiguió duplicar el agua faltando únicamente que embovedar 5 metros de terreno flojo al final del frontón*"...

Las últimas Ordenanzas de la Comunidad de Regantes de Aguas de Zucaña, aún en vigor, son las aprobadas el 14 de noviembre de 1963. Indican que los propietarios tienen derecho al aprovechamiento de los manantiales de Zucaña, Fuente de la Plata y Fuente de la Mearrera, además de las que surgen en la rambla de los Molinos. También se consigna que tienen derecho al aprovechamiento de la fuerza motriz del agua los nueve molinos de la Ribera de Zucaña.

### **Características constructivas**

La Mina o Minado de Aguas de Zucaña, con un estado de conservación algo deteriorado en sus elementos constructivos que todavía permite un funcionamiento hídrico aceptable, se compone de una compleja red de



**Foto 1.** Bocamina de acceso al sistema de galerías de Aguas de Zucaña.

**Photo 1.** Access point to the gallery system of Aguas de Zucaña.

galerías que se extienden por la partida de la Labor de Zucaña, en la vaguada formada entre la Casa de Zucaña y el extremo septentrional del Cerro Mortero. Esta captación se corresponde con la tipología del *qanat*, que, como ya ha sido comentado, es un sistema de acopio de caudal por medio de túneles horizontales. Se trata de un minado con numerosas ramificaciones, en las que algunas galerías se bifurcan en dos o tres ramales en su tramo final, y dispone de 10 cabezas o nacimientos de agua que concentran las surgencias difusas existentes en el sector intermedio de la rambla de los Molinos. Estas características constituyen su principal singularidad, ya que son poco habituales los minados con 5 o más cabezas. Como ejemplos de galerías policéfalas se pueden citar la Fuente de Canto en Cuenca y la Fuente Redonda en Alpera (Albacete), con 5 y 6 cabezas respectivamente (Antequera y Pérez Cueva, 2012), y el Arca del Agua en Guadalupe (Cáceres) con 7 (Antequera *et al.*, 2008).

La longitud total del entramado de galerías de Zucaña alcanza los 1.625 m. La entrada puede realizarse por la bocamina, que es una caseta cerrada con una puerta metálica (Foto 1), o por una apertura situada en el extremo noroccidental del Cerrico de Trunfas o Cerro Mortero, por donde se accede a la galería de la Fuente de la Plata. En la bocamina se recogen las aguas en una arqueta que permite derivar parte del caudal para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Almansa, destinándose el resto al regadío tradicional. Las ramificaciones del minado se van uniendo en diversos puntos hasta que se juntan finalmente en una única galería, a sólo unos 75 m de la bocamina.



**Foto 2.** Aspecto de la galería. Izquierda: Tramo de mampostería con bóveda de medio punto y acequia central. Derecha: Sin refuerzo estructural.

**Photo 2.** Appearance of the gallery. Left: section of masonry with a semi-circular vault and central ditch. Right: without structural reinforcement

Los hastiales de las galerías son de mampostería unida con cal hidráulica. El techo está compuesto por una bóveda de cañón con un arco de medio punto. La sección es de 1,5 m de altura y de 0,8 m de anchura, y la solera dispone de una acequia central de piedra (Foto 2 izqda.). El único tramo diferente es el de los 60 m que van desde la cabecera de la Fuente de la Plata hasta su acceso. Este trayecto se encuentra excavado directamente en la roca, sin ningún refuerzo de obra y con una sección irregular de entre los 2 y 3 m altura y una anchura aproximada de 1,1 m (Antequera, 2015) (Foto 2 dcha.). El minado dispone de una treintena de lumbreras o pozos de aireación de formas rectangulares o cuadradas, de las que sólo algunas están revestidas de mampostería, al igual que el brocal de los registros exteriores en los que se utilizan lajas de piedra para sellarlas (Foto 3).

La descripción de la compleja red de galerías se indica en el Acta de Notoriedad de 24 de septiembre de 1952 (Aguas de Zucaña, 1952). Detalla que el caudal proviene de 9 captaciones, además de la Fuente de la Plata (Figura 2):

A) Aguas de Zucaña: acopia el caudal de surgencias situadas en la Labor de Zucaña, captadas por las siguientes galerías:

*Galería a:* comienza al este de la carretera CM-3220 y se prolonga en dirección norte durante 400 m, donde gira en ángulo recto hacia el este y, después de 30 m, se une con la galería b. Dispone de 10 registros en su trazado, separados entre sí por 40 o 50 m, salvo los dos últimos a cada lado de la carretera, a menor distancia. La última lumbrera está en la intersección con la galería b.



**Foto 3.** Lumbreras. Izquierda: Vista exterior. Derecha: Vista interior (revestida de mampostería).

**Photo 3.** Left: exterior view. Right: interior view (covered with masonry).

*Galería b:* se sitúa al este de la carretera y en su primer tramo sigue paralelo a la misma durante 85 m, para después girar hacia el noreste, donde después de 25 m se une con la galería c. Dispone de 3 respiraderos. El más cercano a la cabeza está en el cruce con la galería a, el segundo en el giro que realiza la captación y el último en la intersección con la galería c.

*Galería c:* posee una longitud de unos 400 m y se inicia en el mismo bancal donde principia la galería b. Se dirige hacia el norte, con un trazado próximo a la carretera, atraviesa el subsuelo de la rambla de los Molinos y finaliza en la bocamina de la captación, a la altura de la casilla de peones camineros del km 12 del eje vial. En su recorrido posee 11 lumbreras, varias de las cuales recogen las aguas que afluyen desde el resto de minados: la 1ª está en el empalme con la galería b; la 3ª en el cruce con la galería d; la 7ª está en el punto de intersección con la galería j, que a su vez transporta el caudal recogido en las minas e, f, g, h e i; y la 10ª en la unión con la galería B o Fuente de la Plata.

*Galería d:* a excepción del último sector, en la intersección con la galería c, este minado está ubicado al oeste de la carretera. Sigue una dirección SO-NE y dispone de dos pozos de aireación, el primero a unos 45 m de la esquina sureste de la casa de labor de Zucaña, y el otro en el cruce con la mina c.

*Galería e:* esta bifurcación tiene 125 m de longitud y sólo cuenta con un registro, en la intersección con la galería d. Este minado recibe los caudales de las galerías f, g, h e i, que ya unidos se derivan por la galería j.

*Galerías f, g, h e i:* estas cuatro minas desaguan en la galería e con un trazado perpendicular a la misma. Sus longitudes respectivas son 42, 22, 20 y 6 m y no poseen ningún respiradero.

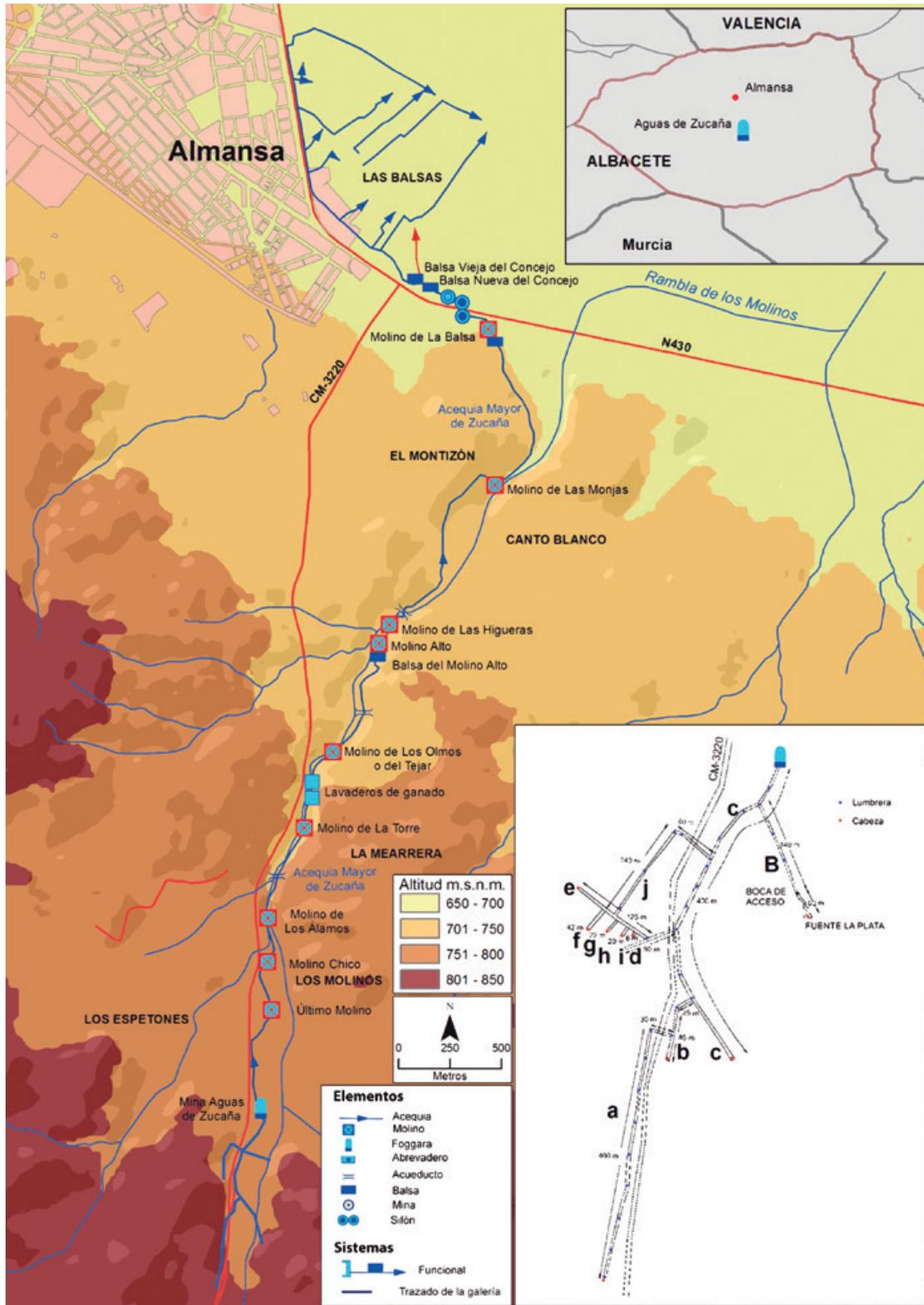
*Galería j:* recoge las aguas procedentes de los minados e, f, g, h e i y las conduce hasta la galería c. Con 180 m de longitud, se inicia en la galería e, al oeste de la carretera, y en sus primeros 140 m va en dirección noreste. Después gira hacia el sureste, pasa bajo la carretera y se junta con el minado c. Dispone de 5 pozos de aireación, el último ubicado en el cruce con la galería c. La primera lumbrera, la más próxima al minado e, tiene unos 14 m de profundidad, una longitud de 1,9 m y una anchura de 1,2 m.

B) Fuente de la Plata (*galería B*): esta galería tiene 200 m de longitud y cuenta con tres lumbreras, la última de las cuales se sitúa en su intersección con la galería c.

### **Usos y aprovechamientos**

El caudal obtenido de las galerías de la Mina de Aguas de Zucaña ha tenido un uso mixto a lo largo de su historia, tanto para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Almansa, aunque en la actualidad ha dejado de hacerse, como para el regadío de unas 75 ha de cultivos hortícolas y cereales. Según la clasificación establecida por Hermosilla *et al.* (2009), por la superficie irrigada se trata de un sistema de pequeña escala, que son los que abarcan desde las 50 a las 250 ha. También, y hasta hace algunos años, era utilizada por varios molinos harineros.

La Acequia Mayor de Aguas de Zucaña circula por la Ribera de Zucaña, Rambla de los Molinos y Canto Blanco, y conduce las aguas hasta las inmediaciones de Almansa, donde se almacena hasta su posterior utilización en las denominadas Balsas del Concejo. Todo este tramo está construido de sillería, a excep-



**Figura 2.** Galerías y sistema de regadío y aprovechamiento de la Mina de Aguas de Zucaña, Almansa-Albacete (Antequera, 2015).

**Figure 2.** Galleries and irrigation system and use of the Mina de Aguas de Zucaña, Almansa-Albacete (Antequera, 2015).

ción de algunos pequeños segmentos excavados en la roca madre. Entre la bocamina y las Balsas del Concejo la acequia se utilizaba exclusivamente como fuerza motriz de los artefactos hidráulicos establecidos en la rambla de los Molinos, los tres primeros (Último Molino, Molino Chico y Molino de los Álamos) en la margen izquierda. Unos metros antes de llegar al cubo del Molino de los Álamos el canal se bifurca. Uno se dirige al molino y el otro atraviesa la rambla a nivel hasta la margen derecha, donde daba servicio a los molinos de la Torre, de los Olmos o del Tejar, el Molino Alto y el Molino de las Higueras. Posteriormente la acequia cruzaba a la margen izquierda mediante un acueducto y dotaba de caudal al Molino de las Monjas y al de la Balsa, antes de desembocar en las Balsas del Concejo. Hasta el siglo XX se han mantenido los 9 molinos que ya indicaba el Marqués de Ensenada (1755) y las *Relaciones* de Tomás López (1786-1789).

La situación actual de estos molinos es bastante deficiente, ya que varios han desaparecido, otros se encuentran en ruinas y, salvo alguna excepción, su estado de conservación no suele ser bueno. Ordenados según el curso descendente de la acequia, estos artefactos hidráulicos son los siguientes:

1- El primer molino del sistema es el denominado Último Molino por ser el más alejado del núcleo urbano de Almansa. El edificio, ya desaparecido, disponía de dos juegos de muelas y aún conserva el cubo de forma cilíndrica construido con mampostería.

2- El Molino Chico poseía también dos juegos de muelas y al igual que en el anterior sólo permanece el cubo.

3- El Molino de los Álamos tenía un solo juego de muelas. El edificio aún existe pero su estado de conservación es deficiente, con una parte del mismo en ruinas. También permanece el cubo, que tiene una forma troncopiramidal y está construido con sillares.

4- El Molino de la Torre se encuentra habitado en la actualidad, por lo que su estado de conservación es óptimo. Dispone aún del caz y del cubo (Foto 4), y cuenta con un juego de muelas. Como señala García Sáez (1988) posee una placa en su interior que indica: "*Molino de la Torre, fue vinculado por D. Marcos de Navarra y García de Ortín el 9 de marzo de 1569 y reedificado por D. José Luis Enríquez de Navarra y Galiano en el año 1877*".

5- El Molino de los Olmos o del Tejar, también desaparecido, disponía de una muela.

6- El Molino Alto es el artefacto mejor conservado del sistema, ya que ha sido rehabilitado por el Ayuntamiento de Almansa y convertido en Aula de Naturaleza. Tanto su maquinaria como su parte hidráulica se hallan en un estado óptimo de conservación, y dispone de un solo juego de muelas y una pequeña balsa.



**Foto 4.** Detalle del caz y cubo del Molino de la Torre.

**Photo 4.** Detail of the "caz" and bucket of the Mill of the Tower.

7- El Molino de las Higueras está completamente desaparecido y ya en 1935 no estaba en funcionamiento. Contaba con un juego de muelas y en la actualidad solo se aprecia el salto de agua donde se ubicaba.

8- El edificio del Molino de las Monjas, con un estado de conservación deficiente, se compone de dos plantas y se desconoce si aún alberga maquinaria en su interior. En 1961 se expropió de forma forzosa al desviar las aguas de Zucaña para el abastecimiento de la población de Almansa. El molino era de rampa y movía una rueda de eje horizontal. En 1941 el cubo se modificó y fue construido de ladrillo macizo, con forma prismática de base cuadrada. La rueda horizontal se sustituyó por una de eje vertical. Contaba con una turbina, dos juegos de muelas de 1,2 m de diámetro, un cernedor hexagonal de 4,4 m de longitud, un mecanismo de limpia, compuesto de zaranda y aparato lavador, y varias transmisiones compuestas por diversas poleas. El salto de agua es de 9,5 m y se le instaló un generador de corriente continua accionado por medio de una transmisión desde el eje vertical de la turbina.

9- El Molino de la Balsa aún posee en su parte superior la alberca que le da nombre (Foto 5). El edificio, que se encuentra en un avanzado estado de ruina, disponía de un único juego de muelas.

El regadío con los caudales de la Mina de Aguas de Zucaña no comienza hasta después de las Balsas Vieja y Nueva del Concejo, situadas unos 500 m al sureste del núcleo urbano de Almansa, en el antiguo camino real que unía Valencia y Almansa. De las dos Balsas del Concejo, la principal acumula las aguas directamente en un vaso de forma irregular de 180 m de longitud. Está construida con piedras de sillería talladas. La balsa supletoria complementa a la principal y posee 140 m de longitud. Estas balsas acumulan el agua que entraba en invierno, pues el primer riego no comienza hasta primavera, y se emplean para el riego de la partida de la Huerta. Después de las balsas el canal está formado por medias cañas de hormigón. Como ocurre en las denominadas fuentes de Alpera, formadas por las galerías de la Fuente Redonda y la Fuente de las Dos Hermanas (Antequera y Pérez Cueva, 2012), el sistema de Aguas de Zucaña posee una morfología lineal con apertura final en la vega situada al este del núcleo urbano de Almansa.

El sistema de regadío se ha ido reduciendo paulatinamente por la expansión urbana de Almansa. Como señala Gil López (2009), en 1917 se inauguró el lavadero municipal en la actual calle del Lavadero, pero la acequia que lo nutría desapareció en la década de 1960 por la construcción del barrio de Pedro Lamata. La Comunidad de Regantes Aguas de Zucaña realizó un canal nuevo que fue destruido entre 1985 y 1988 por la expansión de la ciudad, por lo que tuvo que ser trasladado a la circunvalación de la ciudad para poder dar servicio a las huertas del Zanjón o camino de la



Foto 5. Balsa y cubo del Molino de la Balsa.

Photo 5. Pond and bucket of the Mill Pond.

Columna. Sin embargo, el emplazamiento de nuevas áreas de servicios y comerciales reduce constantemente la superficie regable, lo que provoca el abandono de numerosas parcelas y amenaza el futuro de este regadío con varios siglos de antigüedad.

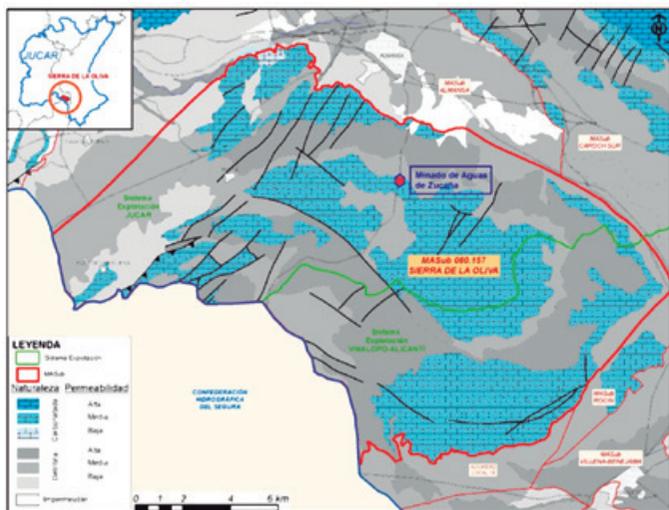
En la segunda mitad del siglo XX se estipulan varios contratos de aguas entre el Ayuntamiento de Almansa y la Comunidad de Regantes de Aguas de Zucaña. El primero data del 19 de mayo de 1959 y contiene las normas por las que actualmente se rige dicha comunidad (AHMAL, 1959). En él se recoge la cesión de agua al Ayuntamiento, que supuso la supresión de los saltos de agua de los molinos mediante la correspondiente indemnización. En 1976 estas aguas dejaron de utilizarse para el abastecimiento a Almansa, pero el agotamiento de las reservas del acuífero de Sierra Oliva obligó a que volvieran a emplearse de nuevo para dicho fin. Por esa causa, se firmó en 1986 un nuevo convenio entre el Ayuntamiento y la Comunidad de Regantes (AHMAL, 1986).

## El acuífero drenado por la galería de Zucaña

### Contexto hidrogeológico

La surgencia-galería de Zucaña queda dentro del sistema hidrogeológico de Sierra Oliva, macizo montañoso a caballo entre las Demarcaciones Hidrográficas del Júcar y Segura formado mayoritariamente por carbonatos del Jurásico superior al Cretácico superior. La parte perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Júcar corresponde a la Masa de Agua Subterránea (MASub) 080.157 Sierra de la Oliva, cuya superficie es de 247,67 km<sup>2</sup> (CHJ, 2015), casi toda de carácter permeable (Figura 3). En ella se distinguen tres conjuntos de formaciones acuíferas con mayor o menor desconexión entre sí. El más profundo lo componen calizas y dolomías del Kimmeridgiense (Jurásico superior), el intermedio calizas de edad Aptiense-Albiense (Cretácico inferior) y el último calizas del Cenomaniense-Turonense junto con calizas arenosas y areniscas del Mioceno (Cretácico superior-Terciario). Estos conjuntos hidrogeológicos, a los que en ocasiones se suman reducidos afloramientos de sedimentos cuaternarios, están separados por sedimentos impermeables o de baja permeabilidad; en el caso de los dos primeros por la facies arcillosa del Weald (Cretácico inferior), y en el del segundo y tercero por los sedimentos arcilloso-arenosos de la facies Utrillas, también del Cretácico inferior (IGME-CHJ, 2010). Todas estas formaciones configuran un sistema multicapa con un espesor medio de 415 m, de los que 320 m corresponderían a materiales acuíferos. La base impermeable de esta estructura vendría dada por las ritmitas de margas y margo-calizas del Kimmeridgiense inferior.

Los estudios existentes cifran los recursos renovables de la MASub 080.157 Sierra de la Oliva en 4,8 hm<sup>3</sup>/año de los que se explotan unos 2,9 hm<sup>3</sup>/año. Otros 2,2 hm<sup>3</sup>/año corresponden a salidas laterales que se dirigen hacia la cuenca del Segura (CHJ, 2015), donde son aprovechadas por bombeos. Esto implica que el volumen de las extracciones supera a los recursos renovables, lo que en las últimas décadas ha provocado un notable descenso de los niveles piezométricos de la masa de agua subterránea y el secado de sus manantiales, con la excepción de la surgencia de Zucaña.



**Figura 3.** Masa de Agua Subterránea (MASub) 080.157 Sierra de la Oliva (Mod. IGME-CHJ, 2010).

**Figure 3.** Groundwater body (GWB) 080.157 Sierra de la Oliva (IGME-CHJ, 2010).

### Condicionantes hidrogeológicos de la surgencia-galería

Según la clasificación de las surgencias-galería establecida por Antequera (2015), por el origen de las aguas captadas el Minado de Zucaña se enmarca en las de tipo mixto, que son las que drenan conjuntamente aguas subterráneas profundas (relacionadas con acuíferos de cierta entidad) y aguas subálveas, en este caso relacionadas con sedimentos detríticos cuaternarios. En cuanto a su ambiente geográfico, queda dentro de la tipología fluvial en la que sus distintos ramales se extienden sobre zonas deprimidas de cauces, vaguadas y fondos de valle.

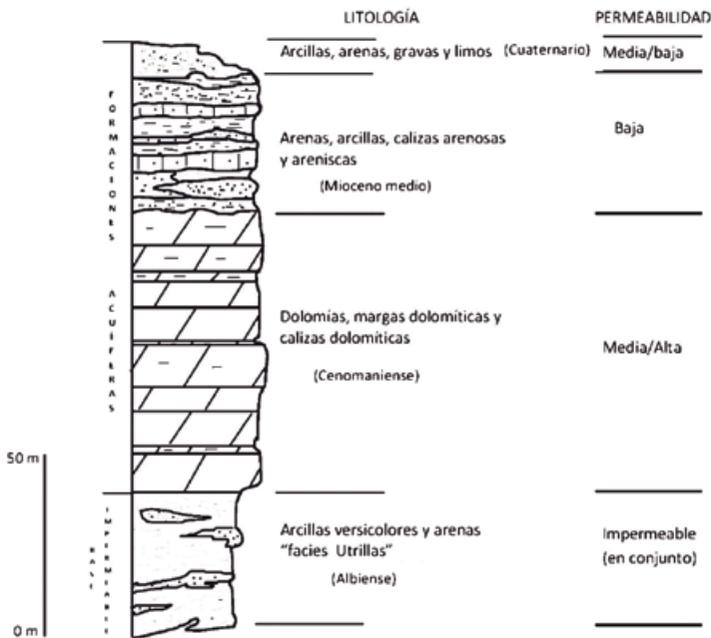
Los datos de aforo históricos sobre los recursos aportados por esta galería son muy escasos. La información obtenida cifra su caudal medio entre 18 y 25 l/s, lo que supone 0,6 a 0,8 hm<sup>3</sup>/año, circunstancia ciertamente relevante en el territorio donde se en-

cuentra (Sureste español), con intensa explotación de las aguas subterráneas e importantes procesos de sobreexplotación de acuíferos causantes de la desaparición de manantiales y del secado de numerosos pozos y sondeos. No obstante, de las observaciones realizadas se puede deducir que este caudal es inferior al de tiempos pretéritos y ha sufrido un paulatino descenso en las últimas décadas. Dentro de este marco general, la existencia de esta surgencia viene determinada por la presencia de una estructura acuífera de moderada extensión (acuífero de Zucaña), independiente y aislada del resto de los acuíferos que integran el sistema hidrogeológico de Sierra Oliva. El manantial surge en este lugar como resultado de la elevación y afloramiento del impermeable de base del acuífero, definido por las arcillas y arenas de la facies Utrillas (Albiense), y constituye el principal, y casi único, punto visible de drenaje del sistema, ya que el resto de surgencias son de muy escasa relevancia y sus caudales medios no superan ni tan siquiera los 0,5 l/s.

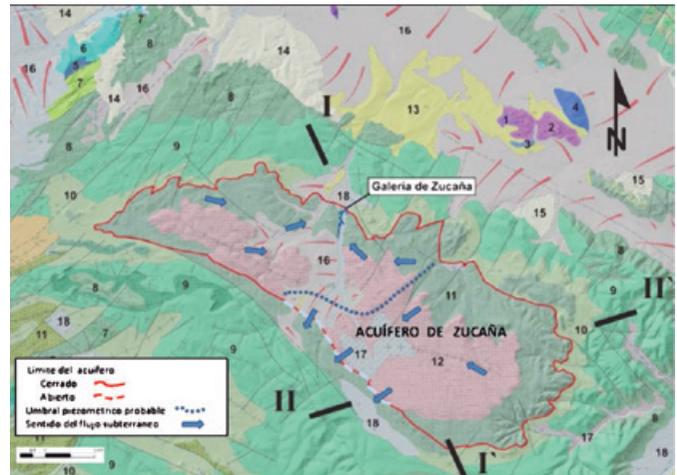
### Características litológicas y geométricas del acuífero

En superficie, el acuífero de Zucaña, en algunos documentos denominado acuífero de Tres Puntas, presenta una disposición alargada en forma de gota orientada según una dirección noroeste-sureste, en la que su parte apical se sitúa en su extremo occidental. Con una longitud máxima de 13 km y una anchura media de tan sólo 3 km, abarca una extensión de 43,3 km<sup>2</sup> ocupada por afloramientos de sedimentos con diverso grado de permeabilidad (Figuras 4 y 5).

La formación acuífera principal está constituida por unos 80 m de dolomías, margas dolomíticas y calizas dolomíticas de edad Cenomaniense (Cretácico superior) que ocasionalmente pueden contener pasadas calcareníticas. Con una menor importancia, y suprayacentes a la formación anterior mediante discordancia erosiva, aparecen materiales detríticos de origen costero con identaciones de materiales continentales. Estos sedimentos pertenecen al Mioceno medio y alcanzan un espesor máximo de unos 50 m. Están integrados por arenas arcillosas, calizas arenosas, arcillas y areniscas en los que se da un progresivo incremento de la fracción fina hacia los niveles más elevados, de manera que en los inferiores pueden encontrarse paquetes de gravas y/o conglomerados de reducido espesor. Por último, sobre las formaciones anteriores y ocupando las zonas deprimidas y de vaguada, se disponen depósitos cuaternarios de materiales sueltos de escaso espesor compuestos por arcillas, limos, arenas y gravas en diversa proporción (Lendínez y Tena-Dávila, 1977).



**Figura 4.** Serie litoestratigráfica del Acuífero de Zucaña.  
**Figure 4.** Lithostratigraphic series of the Zucaña aquifer.



15, 16, 17 y 18 (Q): Arcillas, arenas y gravas (Cuaternario) 9 (C3): Calizas de Rudistas y Orbitolinas (Albiense)  
12 (M): Areniscas calcáreas, calizas aren., arcillas y conglomerados (Mioceno) 8 (C2): Calizas nodulosas con Toucasias (Aptiense)  
11 (C5): Dolomías, margas dolomíticas y calizas dolom. (Cenomaniense) 7 (C1): Margas versic. areniscas y calizas (Barremiense)  
10 (C4): Arcillas, arenas, areniscas y margas. Facies Utrillas (Albiense)

**Figura 5.** Acuífero de Zucaña. Funcionamiento hidrogeológico.  
**Figure 5.** Zucaña aquifer. Hydro-geological behaviour.

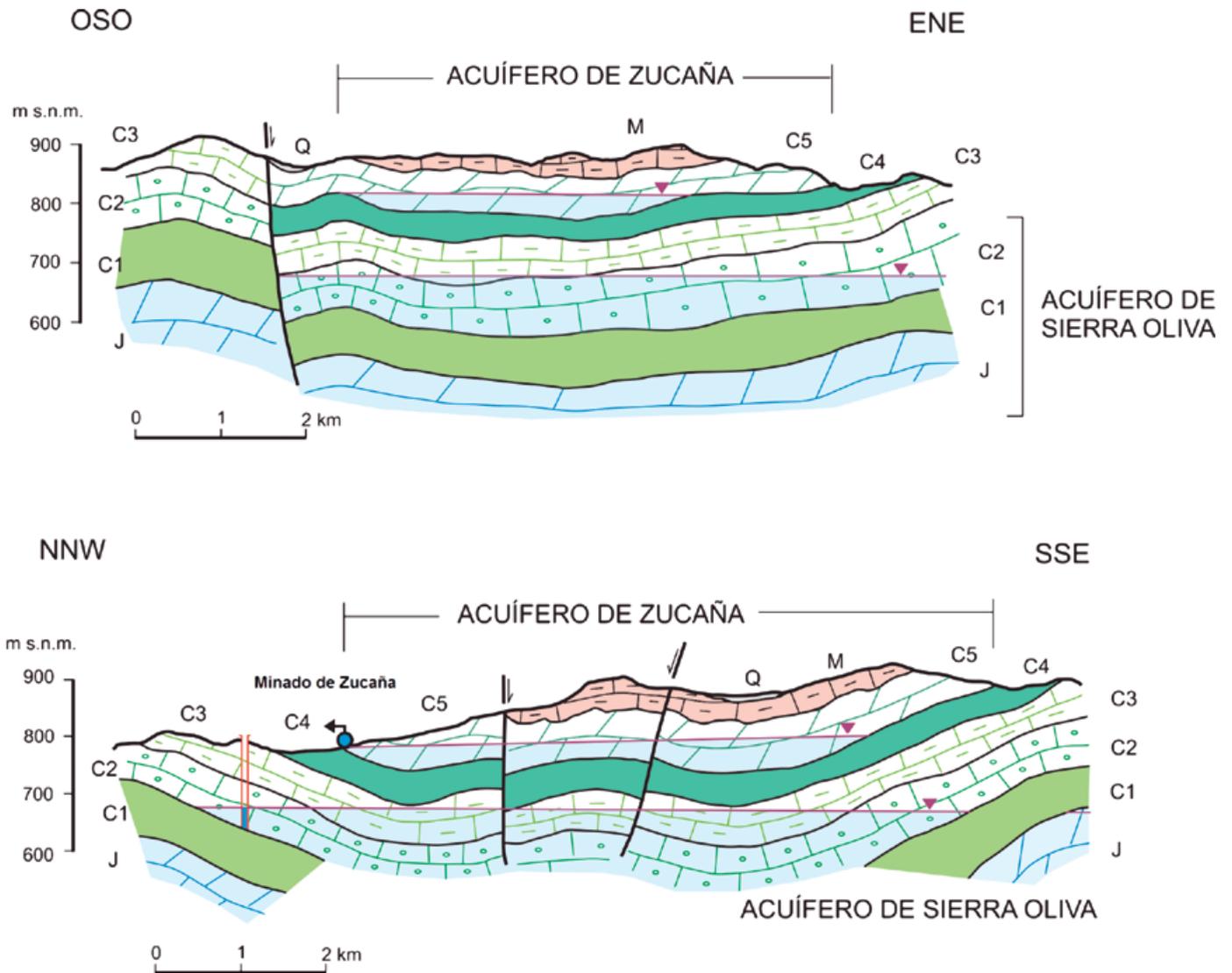
Todos estos materiales se encuentran en conexión hidráulica y constituyen un único acuífero con una potencia media cercana a los 110 m (Figura 4).

La base impermeable del sistema hidrogeológico viene dada por las arcillas versicolores con intercalaciones de arenas de la facies Utrillas que en este lugar configura el tramo superior del Albiense. El espesor más frecuente de estos últimos materiales está comprendido entre los 40 y los 50 m (Lendínez y Tena-Dávila, 1977), lo que les permite sellar el sistema hidrogeológico en profundidad. Esta misma formación también define la mayor parte de sus límites al disponerse a modo de orla según una configuración en suave sinclinal, de dirección aproximada ONO-ESE, en cuyo núcleo se encuentran los sedimentos del Mioceno medio (Figura 5). La única excepción a este esquema general la constituye el límite suroccidental en donde una fractura, con la misma dirección que su eje, hunde el sinclinal y permite el contacto entre la formación permeable Cenomaniense del acuífero con las también formaciones permeables carbonatadas del Aptiense-Albiense localizadas bajo su base impermeable (facies Utrillas, Figura 6 inf.). Debido a esta circunstancia el sistema debe ceder por este límite parte

de sus recursos hacia el infrayacente acuífero de Sierra Oliva (Figuras 5 y 6).

### Recursos renovables. Recarga natural

Con un clima mediterráneo continental, el municipio de Almansa presenta veranos secos y calurosos e inviernos fríos. Su temperatura media anual es de 14,6 °C, siendo los meses más cálidos julio y agosto, con medias mensuales próximas a los 40° C, y enero el más frío, con valores por debajo de los 0°C. Por otro lado, el entorno investigado se sitúa a sotavento de los extensos relieves subbéticos, cuestión que afecta notablemente al régimen de precipitaciones. En el denominado "eje seco" del valle del río Segura, que asciende por el altiplano de Jumilla-Yecla y se prolonga por Hellín y Albatana hasta Pozo Cañada en Albacete, se registran precipitaciones medias anuales inferiores a 300 mm/año. En esta línea, los datos de precipitación de la estación meteorológica (8200) de Almansa, situada a 685 m s.n.m, y analizados por Ponce Herro (1992) indican que la precipitación media anual del periodo 1944-1984 es de 369 mm/año con una desviación estándar de 115 mm/año. La precipitación



Q : Arcillas, arenas y gravas (Cuaternario) C3: Calizas de Rudistas y Orbitolinas (Albiense)  
 M: Areniscas calcáreas, calizas arenosas, arcillas y conglomerados (Mioceno) C2: Calizas nodulosas con Toucasias (Aptiense)  
 C5: Dolomías, margas dolomíticas y calizas dolomíticas (Cenomaniense) C1: Margas versicolores, areniscas y calizas (Barremiense)  
 C4: Arcillas, arenas, areniscas y margas. Facies Utrillas (Albiense) J : Dolomías y calizas (Jurásico)

**Figura 6.** Estructura geológica del acuífero de Zucaña. Perfiles NNE-SSE y OSO-ENE.

**Figure 6.** Geological structure of the Zucaña aquifer. Profiles NNE-SSE y OSO-ENE.

máxima anual del periodo analizado fue de 622 mm y la mínima de 146 mm. Las épocas de mayor pluviometría son la primavera y principios del otoño, separadas por un largo e intenso periodo seco estival. Se está, por tanto, en una zona de condiciones semiáridas en la que la infiltración profunda debe ser muy reducida y concentrada en los episodios lluviosos de primavera y otoño.

Para evaluar la recarga del acuífero de Zucaña generada por la precipitación atmosférica se ha

utilizado el método de balance de agua en el suelo según el procedimiento de Thornthwaite y Mather (1955) en el que por las características climáticas de la región se ha partido de registros a nivel diario. Debido a la escasa calidad y continuidad de las series meteorológicas disponibles se han usado los datos correspondientes al nodo 3168 de la rejilla Spain02 elaborada por Herrera (2012). Se trata de una red de datos meteorológicos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima diaria con una resolución de

Fecha	Pp	T°	ETP	LLU_20	LLU_60	LLU_100	LLU_140
Media	395,0	14,6	783,7	132,2	62,9	31,2	13,9
Desviación estándar	112,5	1,4	63,8	73,5	53,6	39,7	24,5
Mediana	397,1	14,9	770,2	129,5	57,8	12,0	0,0

**Tabla 1.** Precipitación (Pp), temperatura (T°), evapotranspiración potencial (ETP) y lluvia útil (LLU) para capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS) de 20, 40, 60, 100, 140 (Periodo 1971/2007) (valores en mm/año).

**Table 1.** Precipitation (Pp), temperature (T°), potential evapotranspiration (ETP) and useful rain (LLU) for water retention capacity in the soil (CRAS) of 20, 40, 60, 100, 140 (Period 1971 / 2007) (values in mm/year).

2°, (aproximadamente, unos 20 km) que cubre todo el territorio peninsular español más las islas Baleares y que abarca el periodo comprendido entre 1950 y 2008.

El acceso a las distintas versiones de Spain02, en formato NetCDF o ASCII es libre (<http://www.meteo.unican.es/spain02>).

Para el cálculo de todos los elementos del balance hídrico se ha contado con el programa TRASERO (Padilla y Delgado, 2005) en el que la evapotranspiración de referencia, o potencial, se determina por el método de Thornthwaite. Para este cometido se aplicaron capacidades de retención de agua en el suelo (CRAS) de 20, 40, 60, 100 y 140 mm, respectivamente. Dadas las características del territorio, la escorrentía superficial generada es muy baja, por lo que a efectos prácticos puede considerarse que toda la lluvia útil pasa a infiltrarse en el acuífero.

Los principales estadísticos de las series de datos anuales (periodo 1971-2007) de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y lluvia útil para las distintas CRAS, se adjuntan en la tabla 1. La precipitación media cae sobre la superficie del acuífero es de 395 mm/año con una desviación estándar de  $\pm 112$  mm/año.

Según dicha tabla, la lluvia útil estaría comprendida entre un mínimo de 13,9 mm/año y un máximo de 132,2 mm/año. Para la determinación de la recarga media del acuífero debida a la infiltración profunda se ha aplicado una CRAS de 60 mm a la superficie ocupada por las formaciones de calizas y dolomías cretácicas, así como por los materiales aluviales cuaternarios, y de

100 mm a la ocupada por los sedimentos miocenos a causa de su mayor contenido arcilloso. La combinación de la superficie de afloramientos permeables con su recarga media, correspondiente al 1971-2007, permite obtener unos recursos medios renovables de 2,1 hm<sup>3</sup>/año, equivalente a 66 l/s en caudal continuo (Tabla 2).

### **Funcionamiento hidrodinámico y balance del sistema**

Como ya se ha comentado, el acuífero de Zucaña configura una estructura permeable individualizada dentro de la masa de agua subterránea de Sierra Oliva. Se trata de un sistema de pequeñas dimensiones con un funcionamiento hidrodinámico relativamente sencillo, ya que su alimentación tiene lugar de forma exclusiva por la infiltración de la precipitación atmosférica a lo largo y ancho de sus 43,3 km<sup>2</sup> de extensión.

La configuración tecto-sedimentaria del acuífero, con una morfología semejante a una cubeta ligeramente basculada hacia el norte, provoca que una buena parte del flujo subterráneo generado se oriente según una disposición concéntrica en sentido hacia la surgencia-galería de Zucaña ubicada en su límite septentrional a 784 m s.n.m. No obstante, como se ha apuntado en apartados en anteriores, este esquema estructural hace muy factible la existencia de un umbral piezométrico con una cota en torno a los 825 m s. n. m. que dividiría al acuífero casi en dos mitades equivalentes, de manera que el sector oriental alimentase a través de su límite meridional a las formaciones permeables infrayacentes del acuífero de Sierra Oliva (Fi-

Material	Superficie	Recarga	Recursos	
	(km <sup>2</sup> )	(mm/año)	(hm <sup>3</sup> /año)	(l/s)
Dolomías y calizas Cenomanienses	16,6	62,9	1,0	33,2
Detrítico Mioceno	20,2	31,2	0,6	19,9
Detrítico Cuaternario	6,5	62,9	0,4	13,0
Total	43,3	49 (*)	2,1	66,0

**Tabla 2.** Recursos medios estimados del acuífero de Zucaña (periodo 1971/2007). (\*) Media ponderada.

**Table 2.** Average resources estimated for the Zucaña aquifer (period 1971/2007). (\*) Weighted average.

guras 5 y 6) con un nivel de drenaje próximo a los 810 m s.n.m. Tampoco se descarta la cesión de recursos hacia este mismo acuífero mediante alimentación vertical por el concurso de fracturas que permitan reducir el espesor de las arcillas y arenas de la base impermeable albiense y/o conectar parcialmente las formaciones permeables de ambos sistemas hidrogeológicos. Estas circunstancias, junto con la reducida permeabilidad de los sedimentos miocenos, explicarían la baja relación entre los aportes medios de la surgencia de Zucaña y la extensión del acuífero. En esta estructura tampoco existen extracciones por bombeo, hecho que ha permitido mantener el caudal de la galería a pesar de la intensa explotación realizada a través de sondeos en el resto de la masa de agua subterránea en la que se encuentra.

A partir de lo expuesto se puede establecer que este sistema hidrogeológico se mantiene en régimen cuasinatural, con unas entradas de 2,1 hm<sup>3</sup>/año procedentes de la recarga por agua de lluvia y unas salidas repartidas entre los 0,7 hm<sup>3</sup>/año drenados por la galería y el volumen cedido al infrayacente acuífero de Sierra Oliva, cifrado en 1,4 hm<sup>3</sup>/año.

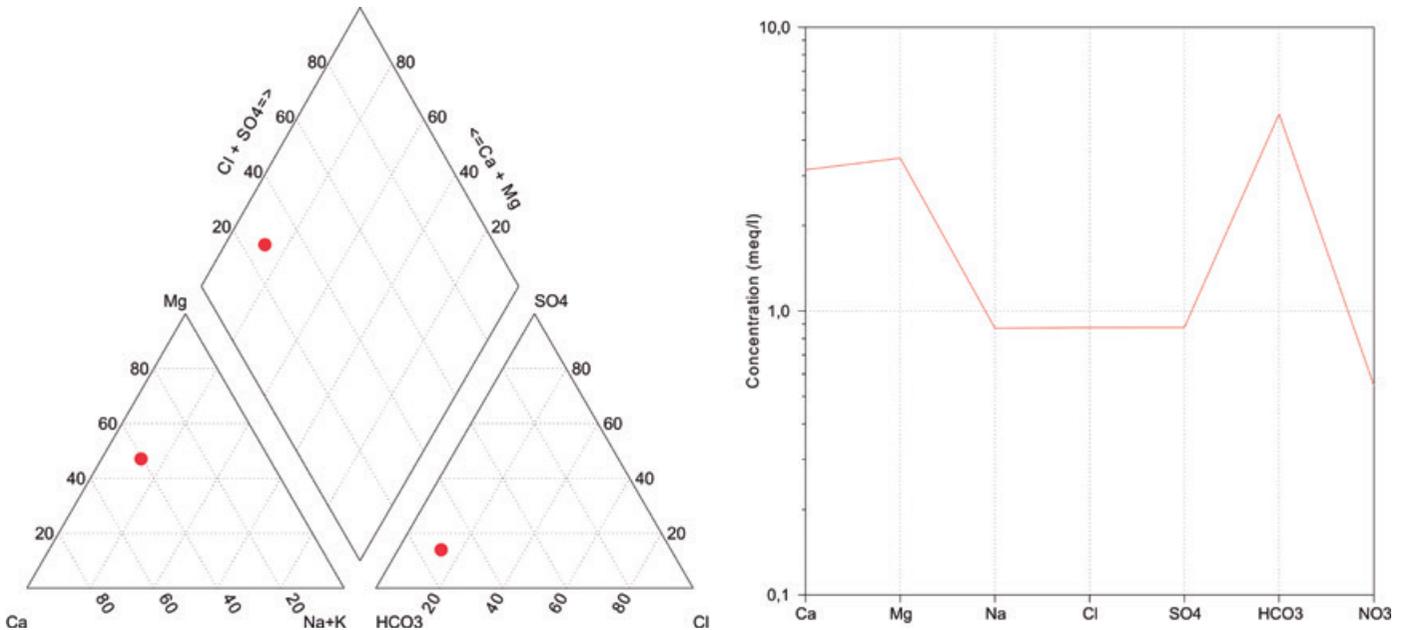
**Características físico-químicas e isotópicas**

La información sobre las características físico-químicas e isotópicas del agua drenada por el minado de Zucaña es prácticamente inexistente, por lo que para este cometido se procedió a tomar una muestra a la salida de la galería en febrero de 2019. El agua surge

en este punto con una temperatura de 15,8°C, similar a la media anual de la zona, una conductividad eléctrica (CE) de 622 µS/cm y un pH neutro, de 7,35. La facies hidroquímica es bicarbonatada magnésico-cálcica (Figura 7), con un agua subsaturada en calcita (IScalcita=-0,011) y en equilibrio con la dolomita (ISdolomita= 0,025). Esto no es habitual en este tipo de aguas y apunta a la existencia de precipitación previa de calcita por desgasificación durante su recorrido a lo largo de la propia galería. La precipitación de calcita implica la pérdida de Ca<sup>2+</sup> y, por consiguiente, un descenso en la relación Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>, lo que explicaría su facies catiónica magnésica.

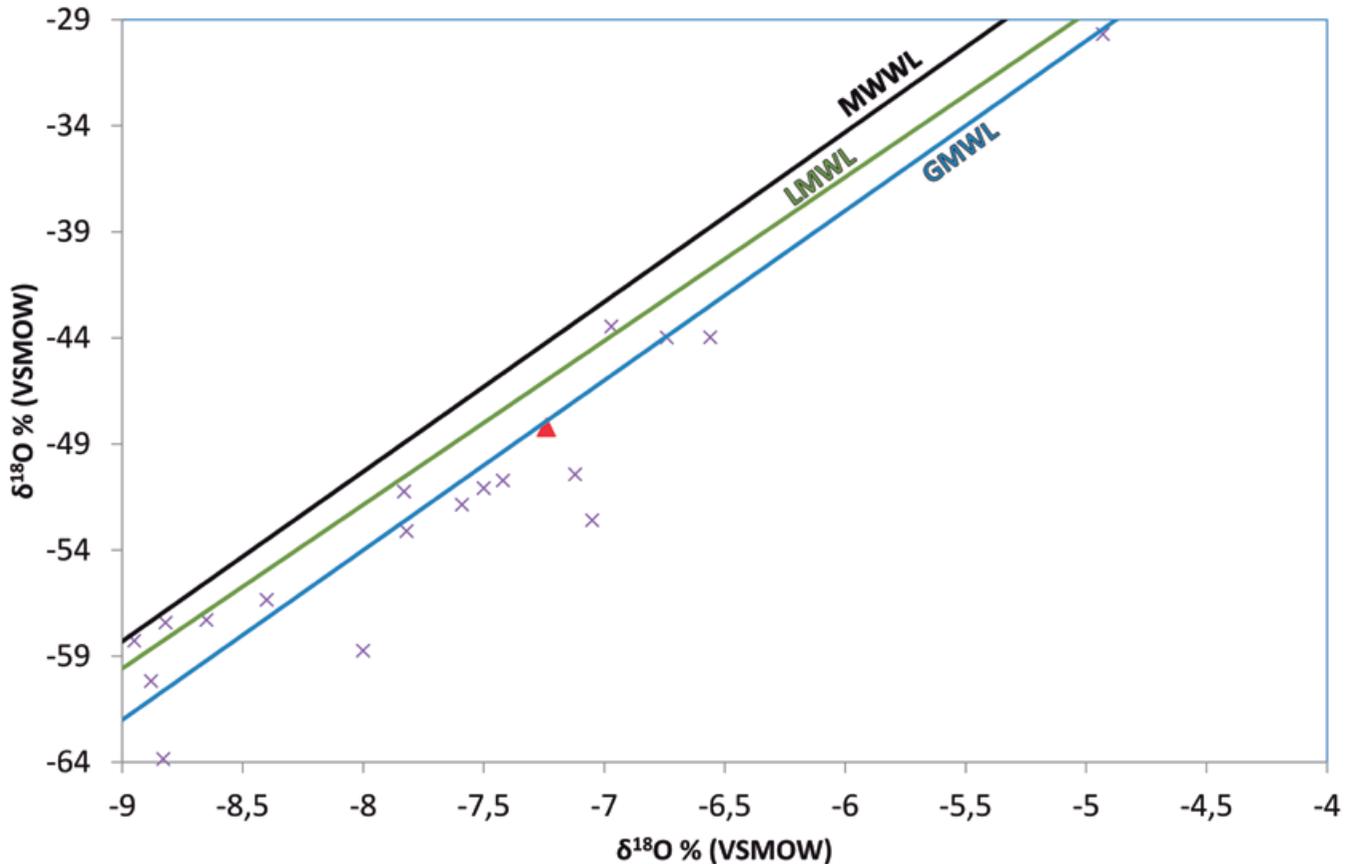
El contenido en cloruro y sulfato es similar, con una concentración iónica casi idéntica (Figura 7, diagrama de Schoeller), hecho que podría ser explicado por concentración del agua de precipitación en el suelo como consecuencia de la evapotranspiración generada en un medio semiárido en materiales detríticos con abundante fracción fina. Es el caso de la formación miocena que recubre los carbonatos cretácicos que constituye el 47 % de la superficie total del acuífero. Una importante concentración iónica es indicio de una elevada capacidad de retención del agua en el suelo y de una baja infiltración, ya que el aporte litológico de estos dos aniones es considerado como no significativo.

El contenido en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es elevado, 34 mg/l, consecuencia de los fertilizantes nitrogenados utilizados en las actividades agrícolas ampliamente desarrolladas sobre los afloramientos permeables del acuífero, espe-



**Figura 7.** Diagramas de Piper (izquierda) y de Schoeller (derecha) del agua de la galería.

**Figure 7.** Diagrams of Piper (left) and Schoeller (right) of gallery water sample.



**Figura 8.** Relación isotópica entre el  $^{18}\text{O}$  y el  $^2\text{H}$ : Agua de Zucaña (triángulo rojo), lluvia en Alcazozo a 80 km hacia el SO (aspas grises) (Hornero, 2018), línea meteórica mundial (azul) (Craig, 1961), línea meteórica del Mediterráneo occidental (negro) (Celle-Jeanton *et al.*, 2001) y línea meteórica local de Guadix-Baza (verde) (Fernández-Chacón *et al.*, 2010).

**Figure 8.** Isotopic relationship between  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$ : Zucaña water (red triangle), rain in Alcazozo to 80 km towards the SO (grey blades) (Hornero, 2018), world meteoric line (blue) (Craig, 1961) meteoric line of the western Mediterranean (black) (Celle-Jeanton *et al.*, 2001) and local meteoric line of Guadix-Baza (green) (Fernández-Chacón *et al.*, 2010).

cialmente sobre la formación miocena. En cuanto a los resultados del contenido isotópico del agua en  $^{18}\text{O}$  y deuterio, son de -7,24‰ para el primero y de -48,22‰ (VSMOW) para el segundo. En la figura 8 se muestra la relación entre ambos comparada con la línea meteórica mundial (GMWL) (Craig, 1961) ( $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ ), la línea meteórica para el Mediterráneo occidental (MWL) (Celle-Jeanton *et al.*, 2001) ( $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 13,7$ ) y la obtenida por Fernández Chacón *et al.*, (2010) ( $\delta^2\text{H} = 7,72 \delta^{18}\text{O} + 9,9$ ) en la depresión de Guadix-Baza (LMWL) que caracteriza los frentes atlánticos en el contexto de la Cordillera Bética. Esta misma figura también muestra la similitud entre el contenido isotópico del agua de lluvia analizada por Hornero (2018) y la drenada por la galería, lo que sugiere que los mismos frentes de precipitación afectan a ambos acuíferos. La distribución de las muestras obtenidas por dicho autor alrededor de la GMWL y de la LMWL, indicadoras de lluvias de procedencia at-

lántica, implica la mayor influencia de estos frentes en el acuífero de Zucaña en contraposición con los mediterráneos.

### Discusión

Las condiciones de semiaridez imperantes en la zona justificarían una baja alimentación del acuífero por infiltración directa de la precipitación atmosférica, establecido en torno a los 2,1 hm<sup>3</sup>/año, volumen que correspondería a sus recursos medios renovables, equivalente a un caudal de descarga continuo de 66 l/s. La tasa media de recarga, 49 mm/año, implica un coeficiente de infiltración del 12% de la precipitación, coherente con el de otros acuíferos de la Cordillera Bética de similares características hidrogeológicas e hidrometeorológicas (Martos-Rosillo *et al.*, 2015).

La galería de Zucaña constituye en la práctica el único punto de salida visible de los recursos del acuí-

fero al que drena y los datos de caudal citados, pese a su escasez, indican que la recarga estimada puede ser asumible. Por su parte, los altos valores de concentración de cloruros, junto con la ausencia de aportes de tipo litológico, apuntan hacia una tasa de concentración por evapotranspiración elevada, como así lo confirma la reducida recarga resultante del balance de agua en el suelo.

El emplazamiento de la galería es el óptimo desde el punto de vista hidrogeológico, al penetrar en la zona saturada de los carbonatos cretácicos y posibilitar tanto la captación del flujo que discurre a través de ellos, como el que transita por la zona no saturada de la formación miocena. Su traza bajo los sedimentos detríticos cuaternarios le permite recoger, adicionalmente, el flujo hipodérmico existente en estos materiales, hecho favorecido por los horizontes de baja permeabilidad intercalados en la secuencia miocena. En su secuencia litológica de carácter detrítico. Hay que indicar que el espesor de la zona no saturada y la existencia de citados horizontes de baja permeabilidad contribuyen a incrementar el tiempo de tránsito del agua desde la superficie hasta la formación cretácica, dilatando el tiempo de respuesta del sistema a la señal de entrada (lluvia). Este hecho ha sido esencial y determinante para el desarrollo urbano y agrícola de Almansa, ya que ha dotado a la surgencia de Zucaña de una gran inercia, traducida en una importante regulación natural de su caudal, por lo que sus aguas han podido ser aprovechadas durante los intensos y prolongados periodos de estiaje característicos de la región.

## Conclusiones

Las galerías drenantes han sido elementos vitales para el asentamiento y mantenimiento de la población en las zonas áridas y semiáridas a lo largo de la historia, como sucede en la región suroriental de España. El caso del minado de Zucaña, cuya toponimia y documentos históricos orientan hacia un origen árabe, por sus características constructivas constituye, además, un sistema hidráulico singular al tratarse de un minado con numerosas ramificaciones y bifurcaciones que dispone de hasta 10 cabezas o nacimientos de agua. El valor arquitectónico de la secuencia de molinos harineros existentes a lo largo de la traza de su acequia, cuya agua les aporta la fuerza motriz, le dota también de un valor adicional.

Su situación geográfica y climática le otorga otras particularidades, como ubicarse en una región con una explotación intensiva de las aguas subterráneas que ha provocado el secado y desaparición de la mayor parte de los manantiales, así como los condicionantes geológicos e hidrogeológicos a los que se encuentra so-

metida la galería, que han permitido su existencia y la permanencia de sus caudales hasta la actualidad. Sin embargo, los resultados aportados por la investigación expuesta en este artículo ponen de manifiesto la gran fragilidad del sistema hídrico relacionado con el minado de Zucaña. En este sentido son dos los factores a tener en cuenta, el primero es que la apertura de nuevas explotaciones de aguas subterráneas pondría en riesgo el caudal drenado por la surgencia debido a los escasos recursos del acuífero. El segundo es que cualquier perforación en el ámbito de este sistema hidrogeológico, con profundidad suficiente para atravesar su base impermeable (arcillas y arenas albienses) y que carezca del adecuado aislamiento, podría provocar el drenaje de éste en profundidad a través de la propia perforación hacia el acuífero infrayacente de Sierra Oliva, con la subsecuente pérdida de caudal en el minado. En este aspecto, es oportuno comentar que no es del todo descartable que, debido a la realización de algunas prospecciones en la zona, este hecho ya pueda haber tenido lugar y haya contribuido a la disminución de aportes sufrida por la surgencia en las últimas décadas.

La divulgación del patrimonio hidráulico de esta galería entre los habitantes de la zona, especialmente entre las nuevas generaciones, ayudará a conocer las condiciones de vida de sus antepasados, y cómo mediante su ingenio y esfuerzo pudieron crear unas condiciones adecuadas para su subsistencia. Bajo esta visión, las aguas subterráneas drenadas por el Minado de Zucaña adquieren un valor innegable, ya que permitieron, además del abastecimiento a la población, el desarrollo de una zona regable y la creación de una floreciente industria harinera con la implantación de un elevado número de molinos. La investigación realizada también debe ser aprovechada para resaltar los aspectos menos conocidos, pero no menos importantes, relativos al funcionamiento hidrogeológico de la galería y potenciar una mayor concienciación medioambiental entre la sociedad, dando a conocer cómo las actividades humanas y los cambios en las condiciones climáticas podrían afectar en el futuro a los recursos hídricos de la región, en general, y a la surgencia de Zucaña en particular.

## Agradecimientos

Este trabajo constituye una contribución a la Red CYTED P419RT0577 "Siembra y Cosecha del Agua en Áreas Naturales Protegidas".

Se agradece la colaboración prestada, para su elaboración, por la Comunidad de Regantes de Aguas de Zucaña y por el Ayuntamiento de Almansa, así como los comentarios constructivos aportados por los revisores del artículo.

## Referencias

- AGUAS DE ZUCAÑA 1952. *Expediente del Acta de Notoriedad "Aguas de Zucaña"*. Protocolo N° 664 del año 1952, Notaría de don Eduardo García-Duarte, Albacete. Copia de 1988.
- AHMAL (Archivo Histórico Municipal de Almansa) 1625. *Copia de las Ordenanzas establecidas para el buen régimen, gobierno y distribución de las aguas que nacen en las fuentes de Zucaña, formadas el 28 de octubre de 1625*. Legajo 1428, exp. 4.
- AHMAL (Archivo Histórico Municipal de Almansa) 1951. *Inscripción del aprovechamiento de Aguas de Zucaña*. Legajo 3376, exp. 9.
- AHMAL (Archivo Histórico Municipal de Almansa) 1959. *Contrato de permuta de Aguas de Zucaña y Ayuntamiento de Almansa*. Legajo 712, exp. 1.
- AHMAL (Archivo Histórico Municipal de Almansa) 1986. *Convenio de Aguas entre el Ayuntamiento de Almansa y la Comunidad de Regantes Aguas de Zucaña*. Legajo 2066, exp. 2.
- Al Karagi, M. 1017. *Kitáb inbāt al-miyāh al-jafiyāa La civilisation des eaux cachées*. En Mazaheri, A. 1973: *Traité de l'exploitation des eaux souterraines (composé en 1017)*. Études préliminaires, N°6. I.D.E.R.I.C., Université de Nice, 187 pp. Edición traducida y comentada al francés por Aly Mazaheri.
- Antequera, M. 2015. *Las galerías drenantes en el sector oriental y suroriental de la península ibérica. Identificación, análisis y gestión patrimonial*. Tesis doctoral. Departament de Geografia, Universitat de València, 1291 págs.
- Antequera, M. y Pérez-Cueva, A. 2012. *Galerías drenantes representativas en la cuenca hidrográfica del Júcar*. En Hermsilla Pla, J. (dir.). *Las galerías de agua en la cuenca hidrográfica del Júcar: un patrimonio hidráulico en el Mediterráneo español*. Colección Patrimonio Hidráulico, N°3, 147-206. Confederación Hidrográfica del Júcar y Departament de Geografia, Universitat de Valencia.
- Antequera, M.; Escrivá, R.; Pérez Cueva, A. y García Patón, J. 2008. *Las galerías drenantes en el interior de la España peninsular*. En Hermsilla Pla, J. (dir.). *Las galerías drenantes en España. Análisis y selección de qanat(s)*. Colección Gestión tradicional del agua, patrimonio cultural y sostenibilidad, N°2, 131-212. Ed. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Barceló, M. y Carbonero, M<sup>a</sup>. A. 1986. *Topografía i tipologia dels qanat(s) de l'illa de Mallorca*. En *Les aigües cercades (Els qanat(s) de l'illa de Mallorca)*, Institut d'Estudis Balearics, Palma de Mallorca, pp. 37-46.
- Barón, A. y Carbonero, M<sup>a</sup>. A. 1987. *Las captaciones por gravedad, qanat(s): Situación actual y posibilidades de uso*. En IV Simposio de Hidrogeología, tomo XI, IGME, Palma de Mallorca, pp. 781-795.
- Beaumont, P. 1989. *The qanat: a means of water provision from groundwater sources*. En Beaumont, P.; Bonine, M. and Mclachlan, K. (1989): *Qanat, Kariz & Khattara: Traditional Water System in the Middle East & North Africa*. Menas Press, London, pp. 13-33.
- Celle-Jeanton, H.; Travi, Y. and Blavoux, B. 2001. *Isotopic typology of the precipitation in the Western Mediterranean region at three different scales*. Geophysical Research Letters, 28: 1215-1218.
- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar) 2015. *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria. Ciclo de Planificación Hidrológica 2015-2021*. Confederación Hidrográfica del Júcar. 852 pp.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.
- English, P. W. 1968. *The origin and spread of qanats in the Old World*, American Philosophical Society, 112, pp. 170-181, Philadelphia, Pennsylvania.
- Ensenada, Marqués de 1755. *Respuestas generales al interrogatorio del Marqués de la Ensenada*. Archivo General de Simancas, CE, RG, Respuestas de Alpera y Almansa, Legajo 463.
- Fernández-Chacón, F.; Benavente, J.; Rubio-Campos, J.C.; Kohfahl, C.; Jiménez, J.; Meyer, H.; Hubberten, H. and Pekdeger, 2010. *Isotopic composition ( $\delta^{18}O$  and  $\delta D$ ) of precipitation and groundwater in a semi-arid, mountainous area (Guadiana Menor basin, Southeast Spain)*. Hydrological Processes, 24/10: 1343-1356.
- García-Sáez, J. 1988. *La edificación rural en el término municipal de Almansa*. Serie I, Ensayos históricos y científicos, N°38, 120 págs. Ed. Instituto de Estudios Albacetenses de la Excma. Diputación de Albacete, C.S.I.C.
- Gil-López, L. 2009. *Historia de Almansa. Comunidad de Regantes de Aguas de Zucaña. Historia y seguimiento de la Acequia Mayor por Almansa y su contorno*. Informe inédito.
- Goblot, H. 1979. *Les Qanats, une technique d'acquisition de l'eau*. École des Hautes Études en Sciences Sociales, Ed Mouton, París.
- Gómez-Cortés, J. y García-Sáez, J. 1987. Los molinos de agua de Zucaña (Almansa): Un modelo de arquitectura popular. *IV Jornadas de Etnología de Castilla la Mancha*, Albacete, 26-28 de septiembre de 1986, Servicio de Publicaciones, Junta de Comunidades de Castilla-la Mancha, 580 pp.
- Hermsilla-Pla, J. (dir.) 2012. *Las galerías de agua en la cuenca hidrográfica del Júcar: un patrimonio hidráulico en el Mediterráneo español*. Colección Patrimonio Hidráulico, N°3, 229 pp. Confederación Hidrográfica del Júcar y Departament de Geografia, Universitat de Valencia.
- Hermsilla-Pla, J.; Estrela Monreal, T. and Peña Ortíz, M. 2009. *Los regadíos históricos españoles*. En Geografía, territorio y paisaje: el estado de la cuestión. Actas del XXI Congreso de Geógrafos Españoles, Ciudad Real, pp. 1.499-1.512.

- Herrera et al. 2012. *Development and Analysis of a 50 year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)*. International Journal of Climatology 32:74-85.
- Herrero, G. P. (1992). *Tratamiento estadístico de las precipitaciones en un área de transición entre las tierras de Alicante, Murcia, Albacete y Valencia*. Investigaciones Geográficas (Esp), (10), 103-123. <http://www.meteo.unican.es/spain02>
- Hornero-Díaz, J.E. (2018). *Contribución de las técnicas hidroquímicas, isotópicas e hidrodinámicas a la caracterización de acuíferos carbonatados y su relación con la red de flujo superficial. Aplicación al acuífero de Alcazovo (cuenca del Segura)*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena
- IGME-CHJ 2010. *Informe sobre la caracterización básica de las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar*. Instituto Geológico y Minero de España. Fondo documental. Madrid. 483 pp.
- Javan, M.; Hassanli, A. M. and Shahrokhnia, M. A. 2006. The ancient qanats of Iran. *1st IWA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in ancient Civilizations*. Iraklio, Greece, 28-30 October 2006, pp. 531-534.
- Lendínez-Gonzalez, A. y Tena-Dávila Ruiz M. 1977. *Mapa Geológico de España. MAGNA, E 1:50,000, n°819 (27-32). Caudete*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- López, T. 1786-1789. *Relaciones geográfico-históricas de Albacete (1786-1789) de Tomás López*. Estudios, edición crítica y comentarios por Fernando Rodríguez de la Torre y José Cano Valero, Instituto de Estudios Albacetenses y CSIC, Albacete, 1987.
- Madoz, P. 1845-1850. *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones en Ultramar*. Madrid.
- Martos-Rosillo, S.; Durán-Valsero, J.J. y Morales, R. (2018). *El agua subterránea en la Historia. De cómo la humanidad se ha abastecido mediante aguas subterráneas desde el Paleolítico hasta la época de las catedrales góticas*. Colección Planeta Tierra. Instituto Geológico y Minero de España-Los Libros de la Catarata. Madrid. ISBN: 978-84-9138-072-6. 142 pp.
- Martos-Rosillo, S.; González-Ramón, A.; Jiménez-Gavilán, P.; Andreo, B.; Durán, J.J. and Mancera, E. (2015). *Review on groundwater recharge in carbonate aquifers from SW Mediterranean (Betic Cordillera, S. Spain)*. Environmental Earth Science. 74 7571-7581
- Oliver-Asín, J. 1958. *Historia del nombre "Madrid"*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Miguel Asín, 412 pp.
- Padilla, A. y Delgado, J. 2005. *Tratamiento y gestión de serie de datos hidrológicos. Manual de Usuario*. TRASERO: Diputación Provincial de Alicante. 49 pp.
- Pereda-Hernández, M. J. 2009. *De villa a ciudad: la evolución histórica de Almansa a lo largo del siglo XVIII*. Al-Basit, Revista de Estudios Albacetenses, 53, 237-286.
- Pereda-Hernández, M. J. 2010. *Notas históricas sobre las Aguas de Zucaña*. Informe inédito, 8 pp.
- Piqueras-Haba, J. 2012. Aproximación histórica a las galerías de agua: una visión desde la perspectiva histórica. En Hermosilla Pla, J. (dir.). *Las galerías de agua en la cuenca hidrográfica del Júcar: un patrimonio hidráulico en el Mediterráneo español*. Colección Patrimonio Hidráulico, N°3, 21-38. Ed. Confederación Hidrográfica del Júcar y Departament de Geografia, Universitat de Valencia.
- Semsar-Yazdi, A. A. and Khaneiki, M. L. (eds.) 2012. *Qanat in its Cradle. Situation of Qanat (Kariz, Karez, Falaj) in the World*. Volume 1. Ed. ICQHS (International Center on Qanats & Historic Hydraulic Structures), 350 pp.
- Semsar-Yazdi, A. A. and Khaneiki, M. L. 2010. *Veins of desert. A review on the technique of qanat/falaj/karez*. Ed. ICQHS (International Center on Qanats & Historic Hydraulic Structures), 310 pp, Yazd, Irán.
- Thorntwaite, C.W. and J.R. Mather. 1955. *The water balance*. Publications in Climatology 8, no. 1: 1-104.
- Troll, C. y Braun, C. 1974. Madrid. *El abastecimiento de agua de la ciudad por medio de "qanates" a lo largo de la Historia*. Geographical Journal, 1-4, pp. 235-314.

Recibido: julio 2019

Revisado: noviembre 2019

Aceptado: enero 2020

Publicado: marzo 2021