

# Comparación entre 3 metodologías para la determinación de la altitud del área de recarga de manantiales de la Sierra de Segura (Jaén) basadas en isótopos ambientales

*Comparison between 3 methodologies for the determination of the recharge heights in springs of the Sierra de Segura (Jaén) based on environmental isotopes.*

Antonio Lope Morales-González<sup>1</sup>, Jorge Jódar-Bermúdez<sup>2</sup>, Rosario Jiménez-Espinosa<sup>1</sup>; y Antonio González-Ramón<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología de la Universidad de Jaén; [lmorales@ujaen.es](mailto:lmorales@ujaen.es), [respino@ujaen.es](mailto:respino@ujaen.es)

<sup>2</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC); [j.jodar@igme.es](mailto:j.jodar@igme.es), [antonio.gonzalez@igme.es](mailto:antonio.gonzalez@igme.es)

\*Corresponding author

## ABSTRACT

The study area is located in the Sierra de Segura, in the NE of the province of Jaén, in the Prebetic area, where outcrops of carbonate rocks predominate. The recharge heights of two aquifer systems of great social and environmental relevance have been determined. For this purpose, the stable  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  isotopes of water from 360 samples from 20 springs, collected between October 2020 and February 2023, were analysed. In addition, 430 precipitation samples were taken from 8 pluviocaptors located between 550 and 1809 m a.s.l. Three isotopic methodologies were applied. The first two, through rainfall analysis, and the third through very low flow springs in which the recharge area is located at a similar discharge elevation. The results show higher average recharge height values with the first and second method (1356 and 1163 m for the Cretaceous and Jurassic aquifers), while the third method presents values of 1203 and 999.5 m, respectively. Methods 2 and 3 are the ones that best fit taking into account the average heights of the Jurassic and Cretaceous outcrops (950 and 1250 m a.s.l.). In addition, it is more efficient for sampling.

**Keywords:** Prebetic, Stable Isotopes, Recharge height, Sierra de Segura.

## RESUMEN

La zona de estudio se localiza en la Sierra de Segura, al NE de la provincia de Jaén, en la zona Prebética, donde predominan afloramientos de rocas carbonáticas. Se han determinado las alturas de recarga de dos sistemas acuíferos de gran relevancia social y ambiental. Para ello, se han analizado los isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  del agua de 360 muestras de 20 manantiales, recogidas entre octubre de 2020 y febrero de 2023. Adicionalmente, se tomaron 430 muestras de precipitación obtenidas de 8 pluviocaptadores situados entre las cotas 550 y 1809 m s.n.m. Se han aplicado 3 metodologías isotópicas. Las dos primeras, mediante análisis de lluvia, y la tercera a través de manantiales de muy bajo caudal en los cuales su área de recarga se sitúa a similar cota de descarga. Los resultados muestran unos valores promedio de altura de recarga mayores con el primer y segundo método (1356 y 1163 m para los acuíferos cretácicos y jurásicos), mientras que el tercero presenta unos valores de 1203 y 999,5 m, respectivamente. Los métodos 2 y 3 son los que mejor se ajustan teniendo en cuenta las cotas medias de los afloramientos jurásicos y cretácicos (950 y 1.250 m s.n.m.). Además, presenta mayor eficiencia a la hora de la toma de muestras.

**Palabras clave:** Prebético, isótopos estables, Altura de recarga, Sierra de Segura.

Geogaceta, 76 (2024), 51-54

<https://doi.org/10.55407/geogaceta104567>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 12/02/2024

Fecha de revisión: 19/04/2024

Fecha de aceptación: 07/06/2024

## Introducción

La Sierra de Segura, con cerca 2.000 km<sup>2</sup> se encuentra dentro del mayor espacio protegido de España. Está constituida en su mayor parte por dolomías y calizas del Mesozoico, permeables por fracturación y/o karstificación, constituyendo varios acuíferos (Fig. 1). El acuífero inferior se encuentra asociado a dolomías del Jurásico. Aflora en una banda dirección SO-NE a ambos lados de una depresión intramontañosa principal por la que discurren los ríos Guadalquivir, Hornos, Orcera y Guadalimar (García-Hernández, 1979). De este reservorio se abastecen todos los municipios del lugar a través de

captaciones de agua superficial y de sondeos. Existe un gran número de manantiales de pequeño y mediano caudal asociados al mismo, entre los que destacan las Fuentes del Ojuelo, del Convento de Orcera, de los Cinco Caños de Benatae y la de Trujala.

Sobre el Jurásico se asientan los materiales del Cretácico inferior, formados por niveles de margas, margocalizas y arenas, y que constituye un nivel de baja permeabilidad que individualiza los dos sistemas acuíferos principales (Moral, 2005). A techo, las calizas y dolomías del Cretácico superior, constituyen el acuífero superior (Moral, 2005; Morales González *et al.*, 2018), donde

existe un gran número de sub-acuíferos formados por pliegues sinclinales que han dado lugar a diferentes estructuras y sistemas colgados (Jiménez Espinosa *et al.*, 2017). Se han analizado las descargas de los sub-acuíferos cretácicos de Navalperal, Calar del Espino, Yelmo, Segura y Peñalta.

Las dos formaciones acuíferas principales estudiadas (Jurásico y Cretácico) presentan un funcionamiento complejo.

Por una parte, existe una componente de flujo rápido que circula a través de la red de conductos y otra de flujo lento que lo hace a través de fisuras y matriz de la roca, donde la conductividad hidráulica es menor.

En zonas de alta montaña, el uso de los isótopos estables del agua se ha convertido en una herramienta fundamental a la hora de caracterizar el funcionamiento de los acuíferos. La señal isotópica del agua meteórica se transmite a través del acuífero sin apenas modificación de la señal de entrada del trazador ambiental. El análisis de las series temporales del contenido isotópico en el agua de recarga y descarga de los acuíferos, permite estimar la elevación de recarga y el tiempo de renovación del agua en el acuífero.

El presente trabajo se centra en la comparación de tres métodos isotópicos con el objetivo de definir las alturas de re-

carga. Los dos primeros, utilizan los datos isotópicos de la precipitación para determinar una recta de regresión desde la cual determinar las alturas de recarga de los mismos, mientras que el tercero, utiliza como datos de calibración 6 manantiales de muy bajo caudal situados entre 750 y 1600 m s.n.m., donde su cota de infiltración ha de ser similar a la de descarga debido a que éstos se encuentran cercanos a las cumbres de los relieves.

Materiales y Métodos

Entre octubre de 2020 y febrero de 2023 se realizaron 19 campañas de muestreos en 20 manantiales (380 muestras),

10 asociados al acuífero jurásico y otros 10 a los sub-acuíferos cretácicos. Al mismo tiempo se tomaron 430 muestras de lluvia procedentes de 8 pluviómetros repartidos a diferentes cotas, entre 550 y 1809 m s.n.m.

El estudio isotópico se ha realizado a partir de un total de 810 muestras tomadas entre 2020 y 2023. El análisis de los isótopos ambientales  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se realizó en la Universidad de Almería mediante un analizador láser de isótopos modelo PICARRO™ CRDS L2120-i. Los datos de isótopos para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  está referidos al estándar V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water), de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA). La precisión de las medidas fue de  $\pm 0,1\text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\pm 1\text{‰}$  para  $\delta^2\text{H}$ .

Una vez obtenidos los resultados analíticos, se aplicaron dos metodologías para determinar las alturas de recarga de los manantiales:

**Determinación de las alturas de recarga:** para estimar la elevación de la zona de recarga asociada a la descarga de un manantial, se asume que el contenido isotópico medio de la descarga del manantial corresponde al del agua meteórica (es decir, la precipitación) que recarga el acuífero a la elevación correspondiente (Yanes et. al., 2023). La relación entre el contenido isotópico de la precipitación y la elevación topográfica suele ser linealmente dependiente la cual se denomina línea isotópica altitudinal, y se caracteriza, localmente, como la línea de regresión entre el contenido isotópico medio de la precipitación en diferentes puntos de muestreo y la elevación asociada a dichos puntos de muestreo (Jódar et. al., 2016). Conociendo esta relación, la elevación de recarga asociada a un manantial se obtiene proyectando

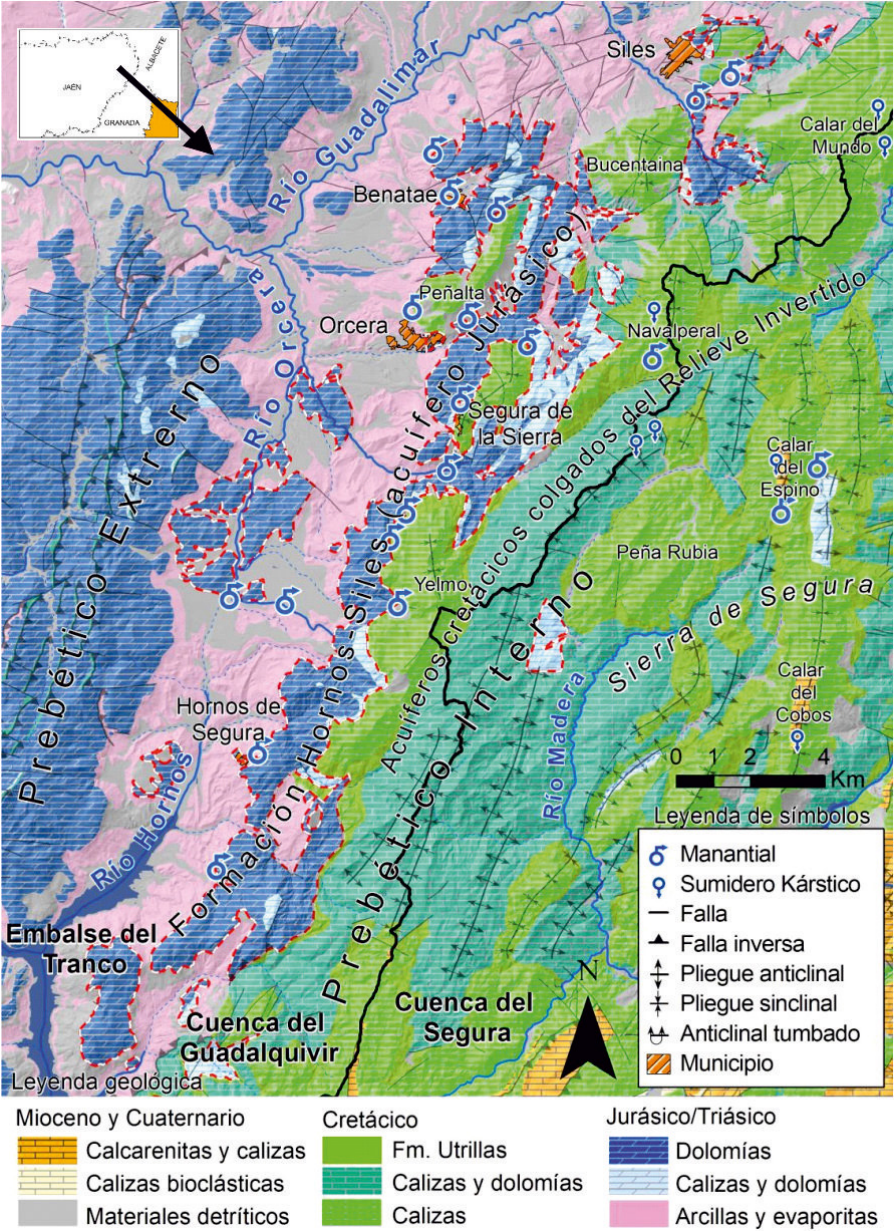
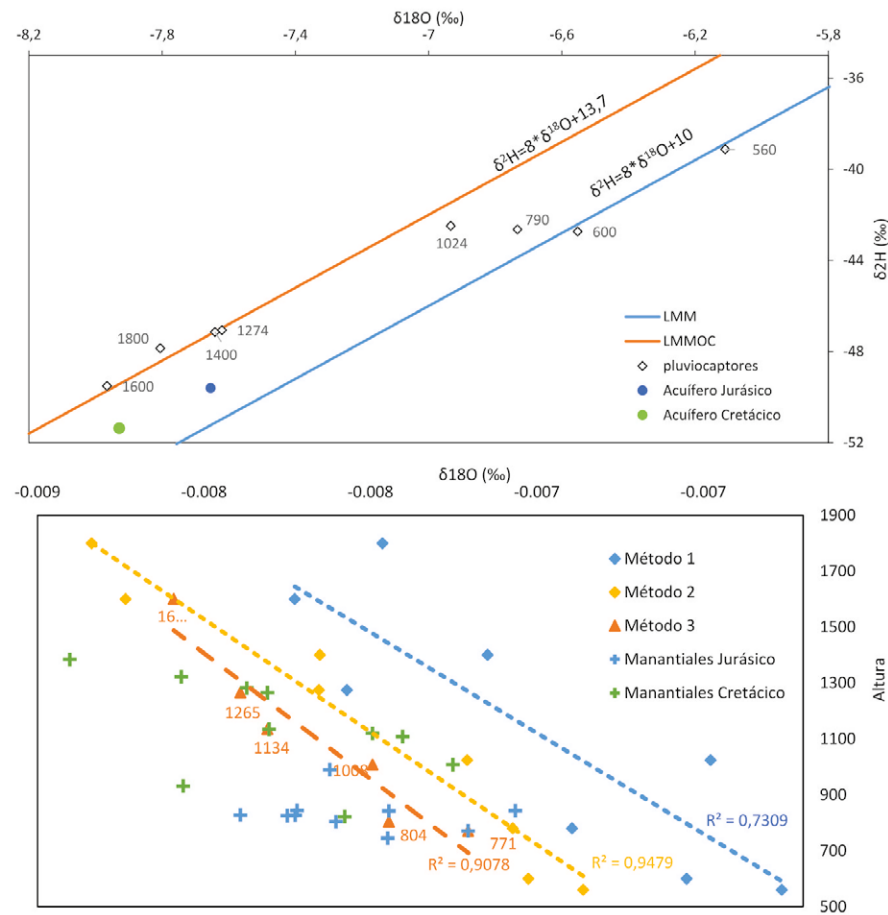


Fig. 1.- Contexto geográfico y geológico de la Sierra de Segura. Cartografía GEODE (www.igme.es). Abajo: Corte hidrogeológico. Modificado de AC López Garrido. Ver figura en color en la web. Figure 1: Geographical and geological context of Sierra de Segura. Cartography GEODE (www.igme.es). Down: hydrogeological cross section. Modified from AC López Garrido. See color figure in the web.

Pluviómetros			Manantiales		
Cota	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Cota	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
1800	-6,94	-42,15	1600	-8,19	-51,41
1600	-7,31	-45,33	1265	-7,99	-51,31
1400	-6,98	-42,72	1134	-7,91	-51,06
1275	-7,77	-49,33	1008	-7,59	-48,93
1024	-6,38	-38,75	804	-7,54	-49,81
780	-6,37	-40,46	771	-7,31	-48,77
603	-5,83	-37,29			
562	-5,61	-35,19			

Tabla 1.- Datos isotópicos medios de los pluviómetros y los manantiales utilizados para la determinación de las curvas de regresión.



**Fig. 2.- (A) Diagrama superior: Valores medios y situación de los pluviocaptadores y los sistemas acuíferos sobre la Línea Meteorica Mundial (LMM) y la Línea Meteorica del Mediterraneo Occidental (LMMOC) (Celle-Jeanton et al., 2001). (B) Diagrama inferior: Distribución del valor medio de los manantiales objeto de estudio sobre las rectas de regresión de los diferentes métodos. Ver figura en color en la web.**

Fig. 2.- (A) Location of the raincaptors and aquifer systems on the World Meteoric Line (WML) and the Western Mediterranean Meteoric Line (WMMWL) (Celle-Jeanton et al., 2001). (B) Distribution of the springs under study on the regression lines of the different methods. See color figure in the web.

el contenido isotópico medio del agua de descarga del manantial sobre la línea isotópica altitudinal. Para determinar el contenido isotópico medio se ha ponderado por el volumen de precipitación de cada evento.

**Método 1.** Se consideran todas las muestras de precipitación.

**Método 2.** La misma aproximación que el método 1 sin considerar las muestras de verano y de precipitación de eventos de precipitación < 20mm.

**Método 3:** se tomaron como referencia de muestreo para la obtención de la línea isotópica altitudinal 6 manantiales (Tabla 1) de muy bajo caudal, en ocasiones <1l/min, situados entre 770 y 1600 m s.n.m., donde se estima que su altura de recarga es muy similar a la de descarga. Finalmente, y mediante la línea de regresión obtenida se determinaron las alturas de recarga de los manantiales objeto de estudio (Tabla 2).

### Resultados y discusión

En el caso de los datos de precipitación, los 3 pluviocaptadores de menor cota (562, 603 y 780 m s.n.m.) se alinean sobre la Línea Meteorica Mundial. El 4 (1024 m s.n.m.) se encuentra en una zona de interfase Atlántico-Mediterránea, mientras que los 4 de mayor cota (1275, 1450, 1600 y 1800 m s.n.m.) lo hacen sobre la Línea Meteorica del Mediterraneo Occidental (Fig. 2A).

Las alturas de recarga varían según el método aplicado. En los manantiales asociados a los sub-acuíferos cretácicos, el método 1 presenta un  $R^2$  de 0.73 y valores comprendidos entre 2.132 y 1.769 m s.n.m. (Tabla 2), por encima de las cotas máximas de la zona de estudio. El 2 ( $R^2=0.94$ ) se ajusta mejor teniendo en cuenta la topografía y las cotas de surgencia de los manantiales, con valores de altura de recarga entre los 1853 y 925

m s.n.m. El Método 3 ( $R^2=0.90$ ) es el que mejor se ajusta a las cotas del área de estudio, con unos valores extremos de 1769 y 734 m s.n.m. si bien en varios manantiales se obtienen alturas de recarga por debajo de su cota de drenaje (Fig. 2B, Tabla 2).

En el caso de los manantiales asociados al reservorio jurásico, es el método 2 en que mejor se ajusta a la topografía de la zona y las cotas de surgencia de los manantiales, y además es el que mejor  $R^2$  presenta (Tabla 2). Este acuífero en particular muestra una característica singular, ya que los valores promedio de altura de recarga superan la cota media de la banda de afloramiento de la formación acuífera (Tabla 2), situada de media aproximadamente a 950m. Este hecho es indicativo de posibles transferencias desde los acuíferos superiores (cretácico) hacia los inferiores (jurásico) a través de los niveles de baja permeabilidad (Facies Utrillas), intercalados entre ellos, los cuales no presentarían un

Altura de Recarga (m s.n.m.)			
	1	2	3
Max.	2131,78	1853,31	1768,86
Min.	1302,77	925,11	733,73
Avg.	1679,17	1346,55	1203,72
Max.	1762,98	1440,39	1308,37
Min.	1167,77	773,96	565,17
Avg.	1515,68	1163,5	999,58
$R^2$	0,73	0,94	0,9

**Tabla 2.- Alturas de recarga estimadas mediante los 3 métodos aplicados. Valores superiores: Sistemas cretácicos. Valores inferiores: sistema Jurásico.**

Sistema		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Cretácico	Max.	-7,35	-48,12
	Min.	-8,5	-55,08
	Avg.	-7,87	-50,87
Jurásico	Max.	-7,16	-45,73
	Min.	-7,99	-51,31
	Avg.	-7,65	-49,84

**Tabla 3.- Valores isotópicos medios de los sistemas acuíferos.**

aislamiento total como hasta ahora se consideraba.

## Conclusiones

Los resultados medios isotópicos obtenidos de los acuíferos jurásico y cretácicos (Tabla 3) y de precipitación (Tabla 1), muestran en primer lugar una mezcla de precipitaciones de origen Atlántico y Mediterráneo (Fig. 2A). Ambos sistemas acuíferos se sitúan entre la Línea Meteórica Mundial (LMM) y a Línea Meteórica del Mediterráneo Occidental (LMMOC).

Los 3 métodos aplicados para la determinación de las alturas de recarga presentan un buen ajuste (Tabla 2).

A través del método 1A los valores de alturas de recarga son elevados, en muchos casos por encima de la cota máxima del relieve.

El método 2 es el que mayor ajuste presenta (Tabla 2), con un  $R^2$  de 0.94. Además, los valores obtenidos de cota de infiltración, se encuentran en consonancia con la topografía y altura de cada sistema acuífero, mientras que el método 3, con un buen ajuste ( $R^2 = 0.9$ ), presenta ciertas discrepancias al obtener cotas de recarga por debajo de la cota de surgencia de algunos manantiales.

Como conclusión sobre los métodos aplicados y en base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que los métodos

2 y 3 son los que mejor resultados presentan.

El método 3 destaca por su alta representatividad en los datos y su mayor eficiencia a la hora de su aplicación, facilitando la toma de muestras, al no depender de las precipitaciones.

En estudios de alta montaña con dificultades de acceso, este método podría sustituir o complementar a los métodos tradicionales.

Además, es relevante el hecho de la posible transferencia de recursos desde el sistema cretácico hacia el jurásico, dado que las alturas de recarga obtenidas para el mismo con los 3 métodos se encuentran a mayor altitud que la cota media del afloramiento. Sería aconsejable ampliar esta línea de investigación.

## Contribución de los autores

El artículo ha sido redactado por ALMG con la colaboración del resto de autores. Los datos de campo han sido recopilados ALMG. Las figuras han sido realizadas por ALMG.

## Agradecimientos

Se agradece a los Proyectos FEDER-UJA 2020 ref.1380934 y PAIDI JA P20-0090 por su apoyo económico y a la

Universidad de Almería, especialmente a Fernando Gázquez por los análisis isotópicos de las muestras obtenidas.

## Referencias

- Celle-Jeanton, H.; Travi, Y.; Blavoux, B. *Geophys Res Lett* 2001, 28, 1215–1218, <https://doi.org/10.1029/2000GL012407>
- García-Hernández, M., 1978. *El Jurásico terminal y el Cretácico inferior en las Sierras de Cazorla y Segura (Zona Prebética)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 344 p.
- Yanes J. L., & Moral F., (2023). *Relief and climate influence on isotopic composition of Atlantic-Mediterranean karst spring waters (Andalusia, southern Spain)*, <https://doi.org/10.1002/hyp.14669>
- Jódar, J.; Custodio, E.; Lambán, L.J.; Martos-Rosillo, S.; Herrera-Lameli, C.; Sapriza-Azuri, G.. *Science of the Total Environment* 2016, 573, 505–517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.117>
- Moral, F., (2005). *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral, Univ. Pablo de Olavide, Sevilla, 580 p.
- Morales González A. L., Jiménez Espinosa R. & Jiménez Millán J. (2018). *Simposio Andaluz del Agua*, Comunicaciones, 659-669.