

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA PRELIMINAR, RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS Y BALANCE HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA CENTRAL DE LA SIERRA DE SEGURA (PROVINCIA DE JAÉN) PARA EL AÑO HIDROLÓGICO SECO 2021/22

Juan José Rovira Medina ⁽¹⁾, Alejandro Carrasco Martín ⁽¹⁾, Beatriz de la Torre Martínez ⁽¹⁾, José Francisco Martín Rodríguez ⁽¹⁾, Matías Mudarra Martínez ⁽¹⁾, Víctor Juan Cifuentes Sánchez ⁽²⁾, David González Rojas ⁽²⁾ y Bartolomé Andreo Navarro ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), 29071, Málaga. juanjrm@uma.es; alejandro.cm@uma.es; delatorrem@uma.es; josefranciscomr@uma.es; mmudarra@uma.es; andreo@uma.es

⁽²⁾ Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Oficina de Planificación Hidrológica. (CHG), 41071, Sevilla. vjcifuentes@chguadalquivir.es; dgonzalez@chguadalquivir.es

RESUMEN

La evaluación de los recursos hídricos disponibles en los acuíferos kársticos es un aspecto fundamental para la correcta gestión y planificación hidrológica, más aún en el contexto actual de cambio climático, con periodos de sequía cada vez más recurrentes. En la presente comunicación se exponen los resultados correspondientes al cálculo de los recursos hídricos y a la aproximación del balance hidrogeológico para un año seco (2021/22) en el sector central de la Sierra de Segura (provincias de Jaén y Granada). La región investigada incluye los acuíferos existentes en los macizos carbonáticos del altiplano kárstico de los Campos de Hernán Pelea. Para ello se han medido, por una parte, las salidas subterráneas (78 hm³/año) y, por otra, se han estimado las entradas o recursos, mediante balance de agua en el suelo, para diferentes superficies de recarga y valores de reserva útil del suelo (RU). La magnitud de recursos medios determinados para una superficie de entre 181 a 207 km² y una RU de entre 40 y 50 mm es la que aporta los valores más coherentes con las salidas totales medidas en los diferentes manantiales que drenan el área de estudio. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales que permitan obtener una comprensión más detallada y completa de los límites y el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos de esta región, dada su situación en la cabecera de las demarcaciones del Guadalquivir y del Segura y por el alto valor para los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.

Palabras clave: acuífero kárstico, balance hidrogeológico, recursos hídricos, Sierra de Segura

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de cambio climático los acuíferos carbonáticos adquieren una relevancia hidrogeológica clave, ya que representan la única fuente de agua subterránea en numerosas regiones del planeta (Ford y Williams, 2007). A escala global, se estima que aproximadamente el 20 % de la superficie terrestre está ocupada por rocas potencialmente karstificables, cifra que aumenta hasta el 22 % en España, lo que representa una superficie aproximada de 110.000 km² (Fernández-Uría y Navarro-Alvargonzález, 1989; Durán et al., 1999). En el caso concreto de Andalucía, 7.000 km² de su superficie corresponden a rocas carbonáticas con comportamiento acuífero, capaces de regular unos recursos hídricos 2.000 hm³/año como valor promedio (Benavente et al., 1986). A pesar de estas cifras generales, aún no se conoce con precisión el funcionamiento hidrogeológico ni los recursos hídricos disponibles en muchos acuíferos kársticos españoles. La adquisición del conocimiento hidrogeológico actualizado es más oportuna, si cabe, y adquiere mayor relevancia con la creciente escasez de agua. Según las previsiones del IPCC (2021), el ascenso paulatino de la temperatura del aire y la reducción de las precipitaciones provocarán una clara disminución de la recarga a los acuíferos y, por tanto, de

la disponibilidad del agua subterránea, al mismo tiempo que aumentarán las presiones sobre estos recursos en detrimento de su papel natural en el ciclo hidrológico (Allen e Ingram, 2002; Ferguson y Glesson, 2012).

En el marco del Convenio firmado entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir -CHG- y el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga -CEHIUMA- (BOE nº 271, de 12 de noviembre de 2021) se está profundizando en el conocimiento hidrogeológico de la Sierra de Segura y de los relieves adyacentes. Entre los objetivos del convenio está el de cuantificar los recursos hídricos subterráneos disponibles, con especial énfasis en las potenciales transferencias de recursos entre acuíferos y entre las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir (MASb Quesada-Castril) y del Segura (MASb Machada y MASb Fuente Segura - Fuensanta) y, además, establecer el balance hídrico para cada sistema hidrogeológico identificado. Esta mejora del conocimiento permitirá avanzar en la comprensión del funcionamiento de los acuíferos y de los procesos e interrelaciones que se producen entre las aguas subterráneas y los sistemas en las que se integran. Con ello, se persigue una mejor gestión del recurso hídrico, más enfocada a la consecución de retos ambientales y a la adecuada atención de las demandas compatibles con esos retos.

En el marco del Convenio CHG-UMA, entre otras actividades, se está realizando un seguimiento detallado de la respuesta hidrodinámica de los manantiales y cauces más relevantes que drenan los acuíferos de la Sierra de Segura. En el presente trabajo se muestran los resultados procedentes de los registros de caudal (puntuales y continuos) medidos en los principales manantiales de la región (Figura 1) -Nacimiento del Río Castril, Nacimiento del Río Segura, Aguamula y Aguasnegras- durante el año hidrológico 2021/22 (seco desde el punto de vista meteorológico). Además, se comparan los valores de las salidas con las entradas estimadas a partir del método de balance de agua en el suelo y del balance de cloruros. Finalmente, se discuten los resultados del balance hidrogeológico y de los parámetros o premisas contempladas en el procedimiento de cálculo. El objetivo último es realizar una primera aproximación a los recursos hídricos subterráneos en condiciones desfavorables (climáticamente secas) y avanzar en la delimitación de las áreas de recarga de los diferentes manantiales que drenan los acuíferos.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Sierra de Segura constituye uno de los mayores afloramientos carbonáticos de la Península Ibérica, con aproximadamente 3.000 km² de superficie, dominada por rocas con edades comprendidas entre el Triásico y el Neógeno. Esta región montañosa, situada en la parte NE de Andalucía (Figura 1), es la cabecera de los ríos Segura y Guadalquivir, así como de sus afluentes más significativos (Aguamula, Borosa, Guadalentín, Castril -Guadalquivir-; Madera y Zumeta -Segura-). El relieve es abrupto, con altitudes que varían entre 500 y 2.136 m s.n.m., e incluye valles profundos y amplias zonas con topografía más suave situadas a cierta altitud, como es el caso del altiplano kárstico de los Campos de Hernán Pelea (Figura 2A). El clima es de tipo mediterráneo con matices de alta montaña (inviernos fríos y húmedos y veranos suaves y secos). Los valores de precipitación y temperatura del aire medios registrados en la región durante el año hidrológico 2021/22 fueron 726 mm y 10,4 °C, respectivamente, según datos tomados en una estación meteorológica situada en el altiplano segureño, instalada en el marco del Convenio CHG-UMA (Figura 1).

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se sitúa en el sector nororiental de la Cordillera Bética, en el Dominio Prebético (García-Hernández, 1978). En esta zona los materiales se encuentran elevados como consecuencia de los esfuerzos compresivos de la orogenia Alpina. La serie estratigráfica comienza con arenas y margas de edad Triásica y calizas y dolomías del Jurásico, aunque el interés hidrogeológico de la Sierra de Segura reside principalmente en las formaciones acuíferas del Jurásico y Cretácico Superior – Terciario; estas últimas objeto de investigación en la presente comunicación: dolomías masivas (500 m de espesor) de edad Cenomaniense (Dabrio, 1972), sobre las que se disponen

calizas, calcarenitas y areniscas de edad Senoniense, con 150 m de potencia (López-Garrido, 1971), y calcarenitas y calizas del Neógeno (Rodríguez-Estrella, 1982) con un espesor total de 100 m. Estas rocas son permeables por fisuración y/o karstificación, y constituyen el armazón de los relieves que conforman la Sierra de Segura. Están limitadas por contactos mecánicos y estratigráficos que involucran margas del Mioceno (hacia techo), mientras que en la base hay arenas y margas del Cretácico Inferior (Figura 1). La estructura geológica consiste en una sucesión de pliegues antiformes y sinformes, de dirección NNE-SSO, afectados por cabalgamientos, fallas normales y de salto en dirección (López-Garrido, 1971; Moral et al., 2008).

El rasgo fisiográfico más característico del ámbito de estudio es la existencia de la mencionada altiplanicie kárstica, que incluye los Campos de Hernán Pelea (Figura 1 y Figura 2A), con un rango de altitud comprendido entre 1600 y 1800 m s.n.m. y una extensión aproximada de 800 km². En esta zona se ha desarrollado un paisaje kárstico (López-Limia & López-Bermúdez, 1985) que incluye abundantes depresiones cerradas como uvalas y dolinas, así como numerosos sumideros kársticos (López-Limia & López-Bermúdez, 1985; López-Limia, 1987; Moral, 2005).

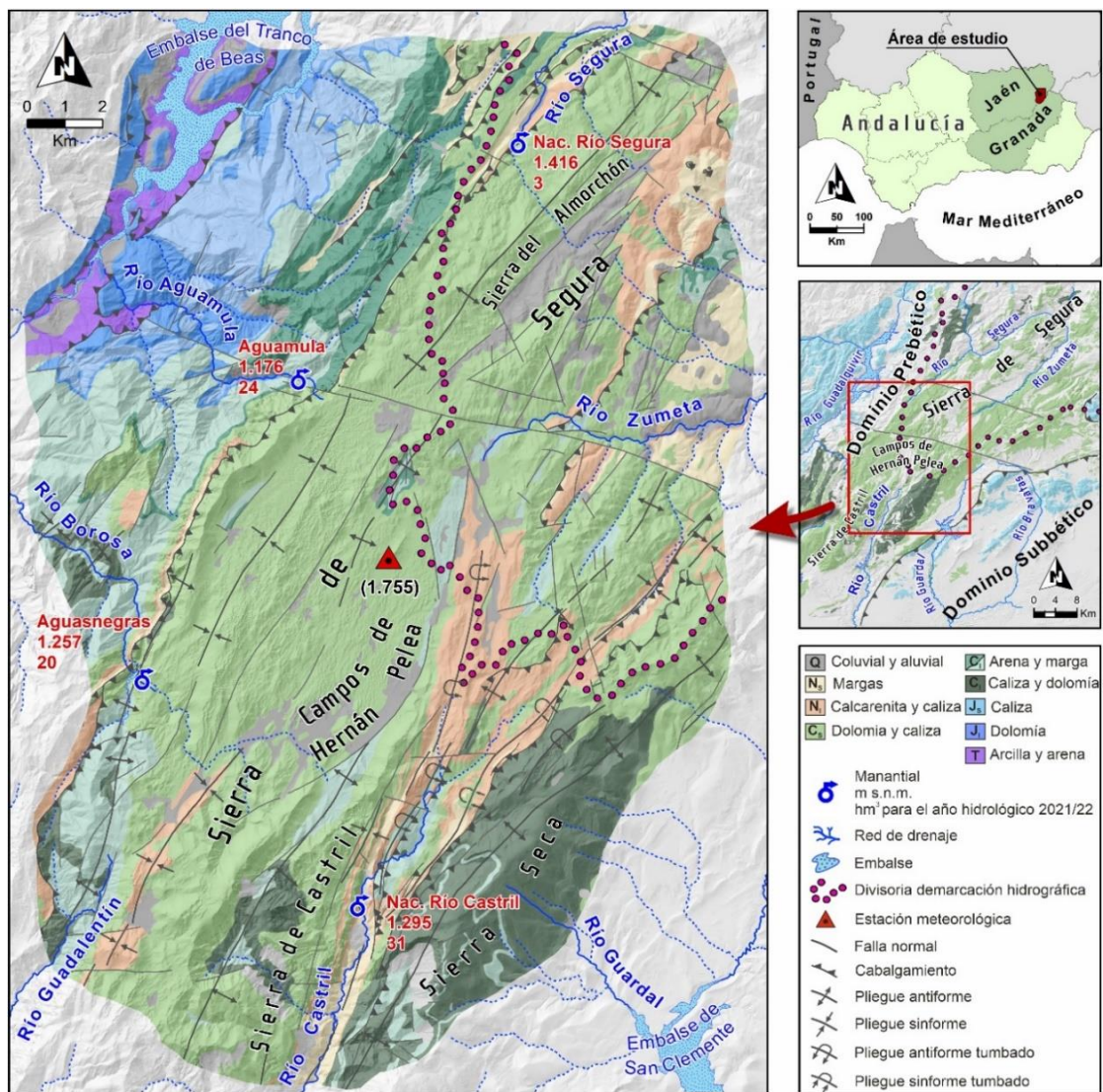


Figura 1. Localización geográfica y mapa geológico-hidrogeológico del sector central de la Sierra de Segura. T = Triásico; J₁ = Jurásico Inferior; J₂ = Jurásico Superior; C₁ = Cretácico Inferior; C₂ = Cretácico Superior; N₁ y N₂ = Mioceno; Q = Cuaternario. Cartografía modificada de Dabrio et al. (1975) y Lupiani et al. (2007)

La recarga de los acuíferos de la Sierra de Segura se produce por infiltración directa (difusa y concentrada) del agua de lluvia y fusión nival sobre los afloramientos permeables, mientras que el drenaje natural tiene lugar en las surgencias localizadas en la periferia del conjunto montañoso y de forma difusa hacia los cauces de la región. Las principales surgencias controladas en el presente trabajo son: al N, Nacimiento del Río Segura (1.416 m s.n.m., Figura 2B); al S, Nacimiento del Río Castril (1.295 m s.n.m., Figura 2C); y, al O, Aguamula (1.176 m s.n.m., Figura 2D) y Aguasnegras (1.257 m s.n.m., Figura 2E).

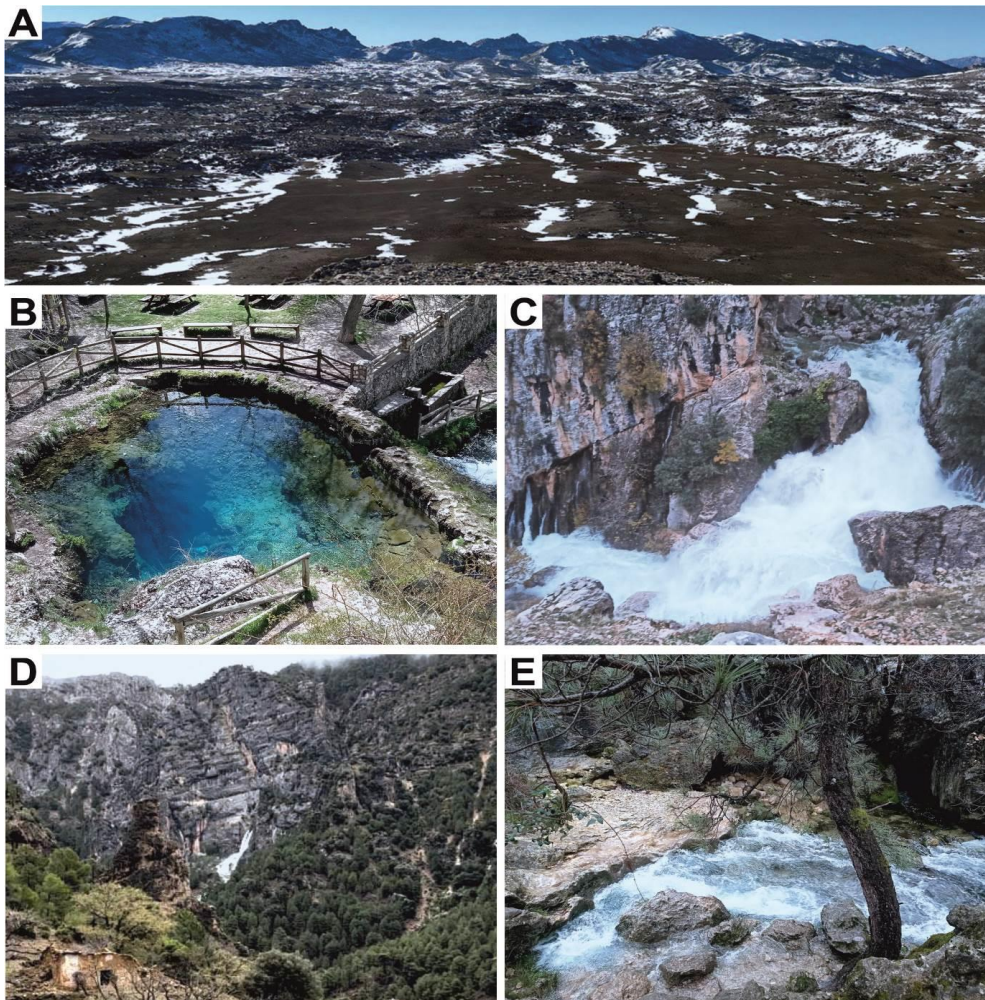


Figura 2. Panorámicas del altiplano segureño y de los principales manantiales localizados en el sector central de la Sierra de Segura. (A) Campos de Hernán Pelea, noviembre de 2021; (B) Nacimiento del Río Segura, abril de 2022; (C) Nacimiento del Río Castril; (D) manantial y cabecera del valle del río Aguamula; (E) surgencia de Aguasnegras. Las tres últimas fotografías realizadas durante las crecidas ocurridas en diciembre de 2022

3. METODOLOGÍA

Desde octubre de 2021 a septiembre de 2022 se llevó a cabo un registro continuo (horario) de la altura de lámina de agua en tres manantiales, a excepción del Nacimiento del Río Segura, cuyo registro comenzó en septiembre de 2022, por lo que en este trabajo se han considerado los aforos puntuales realizados. Para ello se instalaron dispositivos con capacidad de registro y almacenamiento de datos en secciones de cauce invariable muy próximas a los puntos de surgencia. Los dispositivos elegidos fueron CTD-Diver de la marca *Schlumberger* ^(TM). Además, se realizaron medidas del caudal con periodicidad mensual y con mayor frecuencia en condiciones de aguas altas. Cuando el flujo era

turbulento se efectuaron aforos químicos mediante dilución salina, con un equipo de la marca *Etrelec SalinoMADD* y sal común. En los casos con régimen laminar y sección transversal definida se utilizó un micromolinetete de la marca *OTT®*, modelo *C3*. Los datos obtenidos han permitido calcular la curva de gastos (Figura 3), con $R^2 > 0,80$ en todos los casos, con el fin de obtener el hidrograma continuo correspondiente a cada surgencia. A partir de la integral del hidrograma se ha calculado el caudal medio, lo que ha permitido cuantificar el volumen drenado por cada surgencia durante el periodo de control.

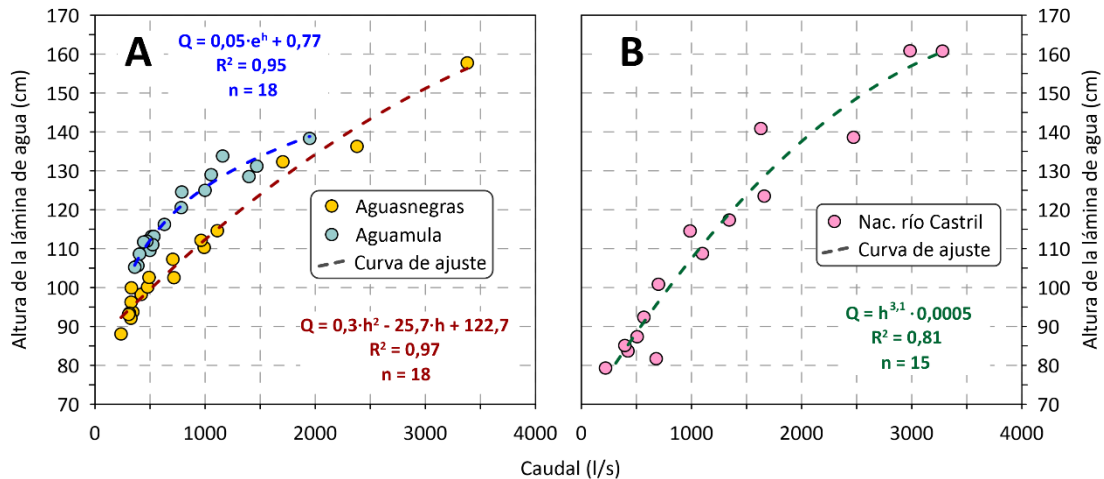


Figura 3. Curvas de gasto de los manantiales de (A) Aguamula (azul) y Aguasnegras (amarillo) y (B) Nacimiento del Río Castril (rosa). Se muestra la ecuación de ajuste matemático para cada relación, el coeficiente de determinación (R^2) ($> 0,80$ en todos los casos) y el número de aforos (n)

Los cálculos del balance de agua en el suelo se han efectuado a partir de los datos diarios de precipitación y de temperatura del aire registrados en la estación meteorológica de los Campos de Hernán Pelea (1.755 m s.n.m.), aplicando la ecuación propuesta por Hargreaves y Samani (1985) para el cálculo de la ETP. La estimación de la infiltración se ha efectuado mediante el método de Thornthwaite (1948). Dicha metodología considera la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP) para el cálculo de la evapotranspiración real (ETR) y de la lluvia útil (PU). Para la cuantificación de dichos parámetros es necesario definir la reserva útil del suelo (RU) que representa la capacidad de retención de agua por parte de la capa edáfica existente en las áreas de recarga. Se han aplicado valores de RU comprendidos entre 20 y 70 mm, a intervalos de 10 mm. Todos los cálculos fueron realizados mediante del código TRASERO 2.5 (Padilla y Delgado, 2013).

Además, se ha aplicado el balance de cloruros como método complementario al procedimiento anterior. Este método se basa en que el ión cloruro tiene un comportamiento conservativo y no sufre procesos modificadores (Schoeller, 1962; Custodio y Llamas, 1983), siempre y cuando no existan litologías que aporten este componente a las aguas subterráneas. Así, la relación entre el aporte de cloruros procedente del agua de lluvia que cae sobre la superficie del acuífero (área de recarga) y el contenido en cloruros del agua subterránea representa la infiltración eficaz (Wood, 1999; Alcalá y Custodio, 2014). Cabe destacar que los valores del ión cloruro del agua de la precipitación utilizados corresponden al punto de muestreo ubicado en la estación meteorológica de los Campos de Hernán Pelea (Figura 1).

En ambos procedimientos, el volumen de recarga se ha calculado con la consideración de que la lluvia útil sobre la superficie ocupada por los afloramientos permeables representa el total del agua que finalmente se infiltra e incorpora al flujo subterráneo. No obstante, en algunos sectores del altiplano afloran materiales de baja permeabilidad (arcillas y margas) que provocan escorrentía superficial, dirigida hacia los sumideros kársticos (recarga concentrada).

4. RESULTADOS

4.1 Respuestas hidrodinámicas de los manantiales. Aportaciones en el año 2021/22

En la tabla 1 y la figura 3 se muestra el coeficiente de correlación de la curva de gastos calculada para las surgencias de Aguamula, Aguasnegras y Nacimiento del Río Castril. Los valores de caudal registrados varían entre 281 y 5.465 l/s (Aguasnegras), 285 y 5.137 l/s (Nacimiento del Río Castril), 358 y 2.537 l/s (Aguamula), y entre 12 y 649 l/s en el Nacimiento del Río Segura (Tabla 1 y Figura 4). Los recursos hídricos drenados por los cuatro manantiales seleccionados en este estudio durante el año hidrológico 2021/22 sumarían un volumen total de 78 hm³ (Tabla 1). De este valor, aproximadamente el 41 % (31 hm³) es drenado por el Nacimiento del Río Castril y el resto correspondería a las aportaciones de Aguamula y Aguasnegras (24 y 20 hm³, respectivamente). El Nacimiento del Río Segura ha aportado 3 hm³, correspondiente al 4 % del total para el año referido.

Cuenca hidrográfica	Manantial	Curva de gastos, hidrograma y recursos					Hidrodinámica	
		Cota <i>m s.n.m.</i>	R^2	N° de aforos	Estadísticos	Caudal <i>l/s</i>	Recursos Hídricos <i>hm³/año</i>	Tiempo medio de respuesta <i>horas</i>
Guadalquivir	Nac. Río Castril	1.295	0,81	15	Rango 285 / 5.137 Med. 998 C.V. 0,74	31	23	5,81
	Aguasnegras	1.257	0,97	18	Rango 281 / 5.465 Med. 620 C.V. 0,63	20	29	5,31
	Aguamula	1.176	0,95	18	Rango 358 / 2.537 Med. 759 C.V. 0,52	24	32	1,15
Segura	Nac. Río Segura*	1.416	-	19	Rango 12 / 649 Med. 95 C.V. 0,66	3	34	2,61
TOTAL				70		78		

Tabla 1. Parámetros hidrodinámicos (caudales drenados, tiempo medio de respuesta y coeficiente de agotamiento) más representativos de los manantiales durante el año hidrológico 2021/22. * Cálculo realizado a partir de los aforos puntuales, pues no se dispone de registro continuo en el periodo de estudio

Los hidrogramas reflejan variabilidad en la respuesta hidrodinámica de los manantiales (Figura 4). La acumulación de eventos de lluvia se traduce en varias crecidas durante el año hidrológico, cuya magnitud es proporcional a la cantidad e intensidad de las precipitaciones. Durante el periodo investigado se produjeron cuatro crecidas principales en los meses de octubre/noviembre de 2021 a abril de 2022, de mayor magnitud en el Nacimiento del Río Castril y Aguasnegras, y menos significativas en los manantiales de Aguamula y, especialmente, en el Nacimiento del río Segura. El funcionamiento hidrogeológico del macizo carbonático investigado tiene lugar en régimen no influenciado por bombes.

Aunque los hidrogramas de los cuatro manantiales permiten deducir un régimen de descarga típicamente kárstico para los sectores acuíferos drenados (Figura 4), se aprecian algunas diferencias en sus respuestas hidrodinámicas. Así, las crecidas en los manantiales del Nacimiento del Río Castril y Aguasnegras son más rápidas que en Aguamula o el Nacimiento del Río Segura. Este último responde a los eventos de precipitación de forma ligeramente más lenta (~34 horas; Tabla 1), con crecidas de menor magnitud, que las que tienen lugar en el manantial de Aguamula (~32 horas) o en Aguasnegras (~29 horas). No obstante, conviene tener presente que el registro de caudales del Nacimiento del Segura no es continuo. Por su parte, la respuesta hidrodinámica del Nacimiento del Río Castril (23

horas) es la más rápida y la de mayor magnitud, con la excepción de la crecida que se produjo en el manantial de Aguasnegras en diciembre de 2021.

Los resultados anteriores se han completado con un análisis de la curva de agotamiento de los manantiales (Tabla 1). El coeficiente de agotamiento presenta valores más elevados en el Nacimiento del Río Castril y Aguasnegras ($5,81 \times 10^{-3}$ y $5,31 \times 10^{-3}$ días⁻¹, respectivamente; Tabla 1) que los obtenidos en el Nacimiento del Río Segura y Aguamula ($2,61 \times 10^{-3}$ y $1,15 \times 10^{-3}$ días⁻¹).

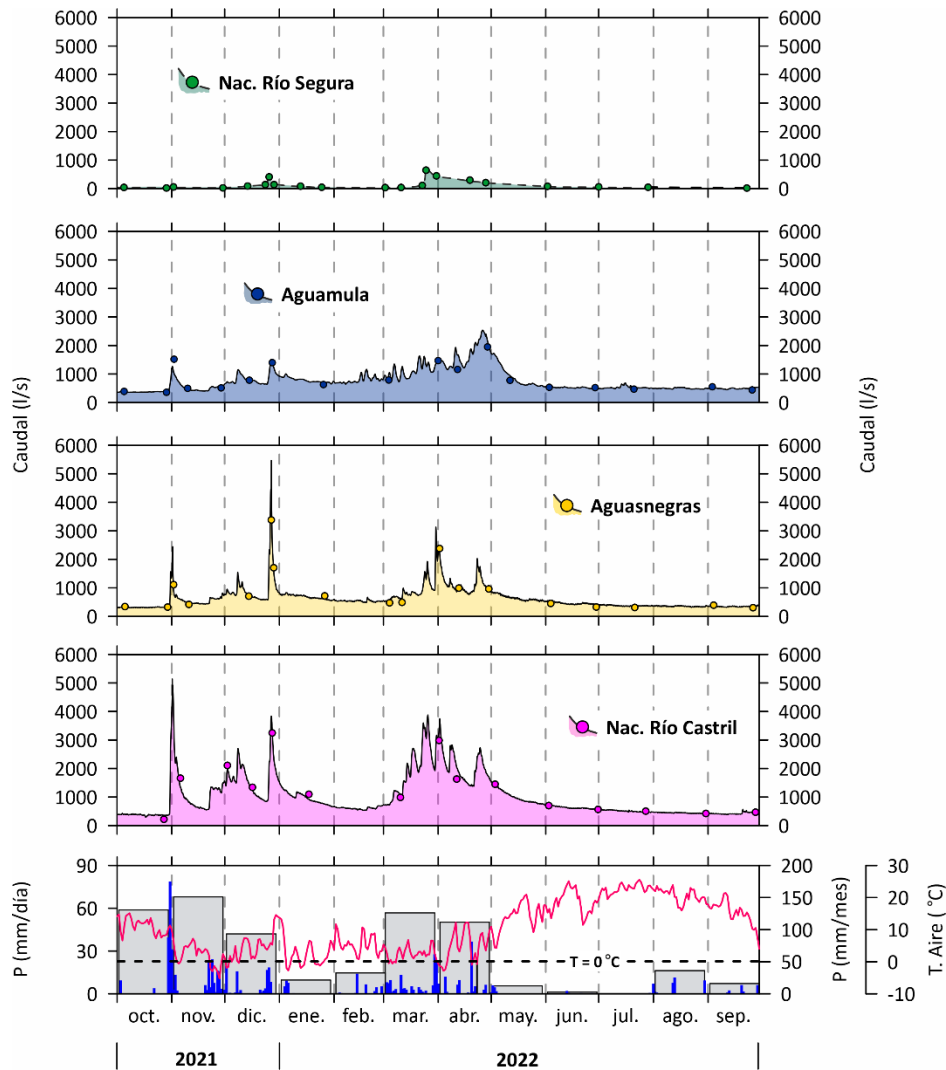


Figura 4. Hidrogramas de los manantiales Nacimiento del Río Castril, Aguasnegras, Aguamulas y Nacimiento del Río Segura, junto con la precipitación registrada (barras azules) en la estación meteorológica de los Campos de Hernán Pelea (véase situación en figura 1) en el año 2021/22. Las barras grises indican la precipitación mensual y la línea roja la temperatura media diaria del aire.

4.2 Estimación de la recarga en el altiplano segureño durante el año 2021/22

4.2.1 Método del balance de agua en el suelo (BAS)

La precipitación registrada en la estación ubicada en los Campos de Hernán Pelea durante el año hidrológico 2021/22 fue de 726 mm, seco desde el punto de vista hidrometeorológico (CEHIUMA-IGME, 2021). La lluvia útil (PU) presenta un rango comprendido entre 393 y 457 mm para los distintos valores de reserva útil de agua en el suelo (RU) considerados en la presente comunicación (de 20 a 70

mm; Tabla 2). Con esta información se ha realizado el cálculo de las entradas para cuatro superficies de recarga progresivamente mayores, desde 121 km² (coincide aproximadamente con los Campos de Hernán Pelea) hasta 207 km² (se extiende hasta parte de la Sierra del Almorchón, el sector norte de la Sierra de Castril y la ladera noroeste de Sierra Seca; Figura 5). La altitud media de estas superficies se encuentra por encima de la cota de surgencia de los manantiales (Tabla 2). De esta forma, se han obtenido hasta 24 estimaciones de los recursos hídricos que podrían infiltrarse en el área de estudio (Tabla 2). El volumen de entrada varía entre 48 hm³ (RU = 70 mm y una superficie de 121 km²) y 95 hm³ (RU = 20 mm y superficie de 207 km²).

Los valores de entradas obtenidos para la superficie de recarga de 121 km² (y para todo el rango de RU) son inferiores a 55 hm³; y superiores a 90 hm³ si se considera una reserva útil menor de 30 mm en una superficie de 207 km² (celdas de tonos rojos en Tabla 2). Estos datos difieren claramente de la descarga total de agua subterránea medida en la presente investigación (78 hm³).

Precipitación 2021/22	Superficie		Altitud media	Balance de agua en el suelo (BAS)						Balance de Cl ⁻	
				RU (mm)	20	30	40	50	60		70
				PU (mm)	457	437	423	413	403		393
	N°	Área		I (%)	63	60	58	57	56	54	61
mm	-	km ²	m s.n.m.	Salidas			Entradas (hm ³)				
726 (1.755 m s.n.m.)	1	121	1.620	78	55	53	51	50	49	48	54
	2	169	1.658		77	74	71	70	68	66	75
	3	181	1.670		83	79	77	75	73	71	80
	4	207	1.675		95	90	88	85	83	81	92

Tabla 2. Precipitación útil (PU) estimada, tasa de infiltración (I) y volúmenes de recursos hídricos (hm³) durante el año hidrológico 2021/22. La precipitación corresponde a la registrada en la estación meteorológica de los Campos de Hernán Pelea (ver figura 1). Las celdas de color verde hacen referencia a los valores que mejor se ajustan con los datos de caudal medidos y las rojas a aquellos que lo sobrevaloran o subestiman

Por su parte, los volúmenes de entradas de 74 a 77 hm³ obtenidos para una superficie de recarga de 169 km² serían los más coherentes respecto a las descargas medidas, pero ello implicaría considerar una reserva útil de 20 y 30 mm en los afloramientos permeables. Estos valores de RU son más bajos que los considerados en estudios previos (Moral, 2005; CEHIUMA-IGME, 2021), en los que se propusieron RU en torno a 40 - 50 mm, compatibles con el tipo de litologías y el desarrollo edáfico en la región. Un rango de RU comprendido entre 40 y 50 mm y una superficie de 181 km² permitiría obtener valores de recarga de 77 y 75 hm³ (celdas en tonos verdes en Tabla 2), respectivamente; y 88 a 85 hm³ para un área de 207 km².

4.2.2 Método del balance de cloruros

En la tabla 2 se muestran los resultados de la tasa de recarga y los recursos medios calculados por el método de balance de cloruros. Se pueden observar diferencias destacables en el volumen medio de entrada en función de las diferentes superficies consideradas en el presente trabajo. El porcentaje de la precipitación que produciría recarga obtenido a partir de los contenidos en Cl⁻ ponderados por la cantidad de lluvia (61 %; Tabla 2) se asemejaría a la lluvia útil calculada a partir de los resultados del balance de agua en el suelo con RU de entre 30 a 40 mm (60 y 58 %, respectivamente). Así, para las superficies nº 2 y 3 las entradas ascenderían a 75 y 80 hm³ (Tabla 2), lo que también representa valores relativamente parecidos a los obtenidos mediante el BAS.

5. DISCUSIÓN

La karstificación que se observa en la superficie del altiplano de la Sierra de Segura parece tener continuidad en profundidad (CEHIUMA-IGME, 2021), a tenor de las respuestas hidrodinámicas de los manantiales (Figura 4). En general, se trata de respuestas rápidas, típicas de un medio kárstico en el que el flujo subterráneo se produce a través de conductos, con baja capacidad de regulación natural del acuífero (Figura 4). No obstante, hay factores como la modalidad de precipitación, el desarrollo edáfico o el espesor del epikarst y de la zona no saturada que pueden contribuir a amortiguar los impulsos de recarga. La morfología del hidrograma del manantial de Aguamula y del Nacimiento del Río Segura, sus tiempos medios de respuesta y los valores del coeficiente de agotamiento, parecen indicar que los sectores de acuífero drenados por ambas surgencias presentan un desarrollo de la karstificación funcional inferior que las áreas que alimentan al Nacimiento del Río Castril o al manantial de Aguasnegras.

Los antecedentes sobre la estimación de los recursos hídricos en el sector central de la Sierra de Segura son escasos y hay que remontarse a informes técnicos (ITGE-UGR, 1990; IGME, 2001) y los trabajos realizados por Moral (2005) y, más recientemente por CEHIUMA-IGME (2021). En las dos últimas investigaciones se calcularon unas salidas medias anuales de 80 hm³/año (periodo 1952 a 2001) y 61 hm³/año (1974/75-2018/19) en las cuatro surgencias incluidas en la presente comunicación. En dichos antecedentes se han considerado series temporales discontinuas, aforos con periodicidad variable (uno a cuatro meses) en los principales puntos de drenaje, que no representan la variabilidad hidrodinámica de los manantiales kársticos con suficiente resolución. En el presente trabajo, el registro continuo del caudal de descarga de los manantiales ha permitido cuantificar el volumen drenado con mayor precisión. Por otro lado, no se puede obviar la variabilidad espacial de las precipitaciones (ni su naturaleza: lluvia o nieve) en la estimación de los volúmenes de agua infiltrados. Así, la estimación de las entradas de Moral (2005) y CEHIUMA-IGME (2021) está limitada por la ausencia de una red de estaciones meteorológicas en el altiplano con la que precisar el tipo y cuantía de las precipitaciones. En el marco de convenio CHG-CEHIUMA se ha instalado una estación termopluviométrica que ha permitido obtener datos de las condiciones climáticas del altiplano segureño.

En cualquier caso, con los datos disponibles hasta el momento (un año hidrológico y de tipo seco) es complicado realizar un balance hidrogeológico en el ámbito de estudio. Se desconoce la superficie de recarga real de los manantiales estudiados, el funcionamiento hidrogeológico detallado de la Sierra de Segura y la capacidad de regulación interanual de los recursos hídricos. Sin embargo, a partir del caudal aportado por los cuatro manantiales durante el año hidrológico 2021/22 (78 hm³; Tabla 2 y figura 5) se puede plantear un balance hidrogeológico preliminar para el sector central del altiplano de la Sierra de Segura, considerando estos recursos como las aportaciones mínimas en una situación desfavorable de sequía. Así, para valores de *RU* de entre 40 a 60 mm, sería necesaria una superficie de recarga comprendida entre 181 y 207 km² (áreas nº 3 y 4 en la tabla 2), lo que daría unas entradas posibles de entre 75 y 83 hm³/año (Tabla 2 y figura 5). Estas cifras son coherentes con los resultados alcanzados mediante el balance de cloruros para un rango similar de superficie de recarga. Sin embargo, hay que tener presentes las limitaciones propias de aplicar cálculos de balance de agua del suelo, más en este caso con los datos de una única estación meteorológica.

Aunque la incertidumbre en la estimación de las entradas es considerable, es posible plantear este análisis como una aproximación inicial al balance hidrogeológico en una situación de sequía (Figura 5). A partir de las interpretaciones realizadas se puede establecer un marco de referencia de recursos hídricos medios (de entrada y de salida) que sirva de base para estudios posteriores. En cualquier caso, es necesario continuar con las investigaciones que se están llevando a cabo en el marco del Convenio CHG-UMA, en diferentes situaciones hidrodinámicas, y realizar ensayos de trazadores artificiales que permitan precisar las áreas de recarga de los manantiales.

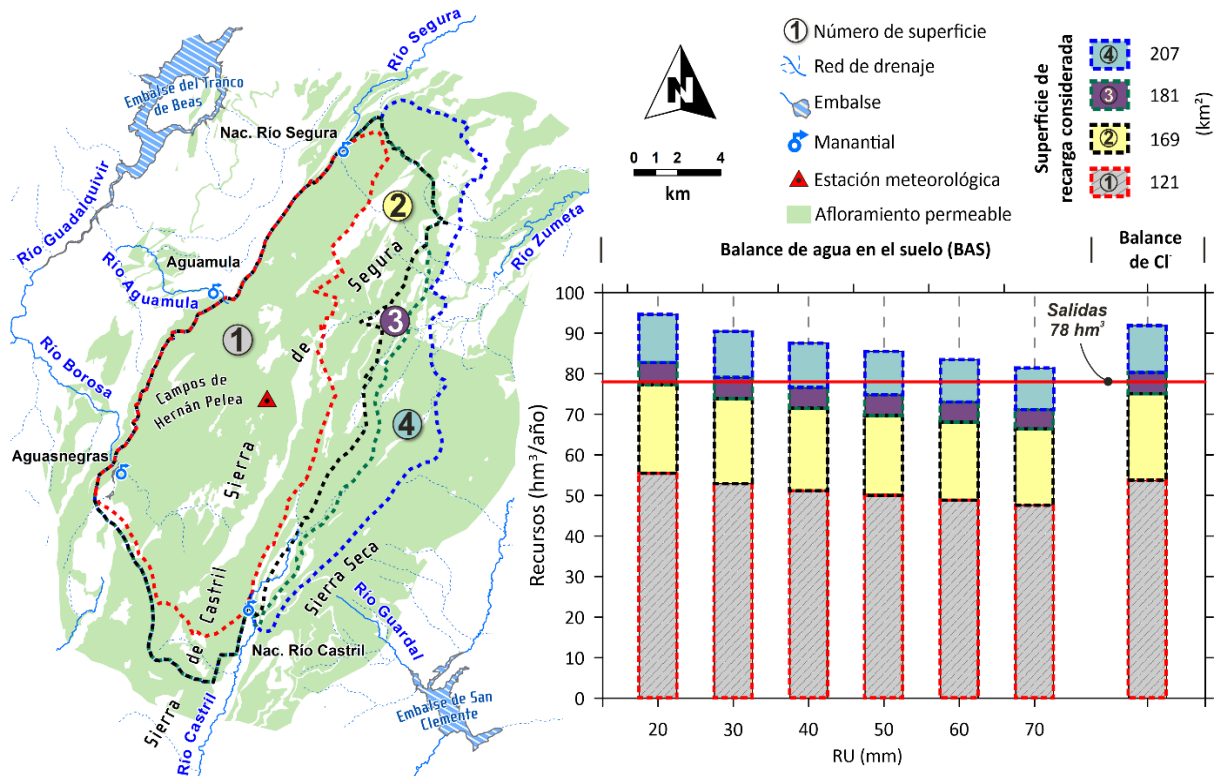


Figura 5. Tentativa de balance hidrogeológico del sector central de la Sierra de Segura para el año 2021/22 (seco). Se muestran las entradas estimadas por los métodos de balance del agua del suelo (BAS) y balance de cloruros para las diferentes superficies y valores de RU considerados.

6. CONCLUSIONES

Durante el año hidrológico 2021/22, seco desde el punto de vista hidrometeorológico (726 mm de precipitación), se ha podido avanzar en el conocimiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura. Se han controlado las respuestas naturales de 4 de los principales manantiales que drenan el sector central del altiplano segureño. El análisis de los hidrogramas apoyado en las consideraciones acerca de las curvas de agotamiento y los tiempos medios de respuesta han permitido estimar, de forma cualitativa y preliminar, que la karstificación funcional del sector central de la Sierra de Segura no es homogénea. El desarrollo de la red de drenaje kárstico sería mayor en los sectores acuíferos asociados al Nacimiento del Río Castril y Aguasnegras, mientras que los correspondientes a las surgencias de Aguamula y el Nacimiento del Río Segura contarían con una menor karstificación funcional. Además, se han medido las descargas de agua subterránea en cada manantial y se han calculado unos recursos hídricos de 78 hm³, buena parte drenados por el Nacimiento del Río Castril (41% del total o 31 hm³), que serían representativos de condiciones hidrometeorológicas secas.

En la presente comunicación se constata que, si bien el cálculo de las entradas a partir del balance de agua en el suelo permite aproximar el valor de los recursos infiltrados en el acuífero, ha sido necesario plantear diferentes valores de reserva útil del suelo (RU) aplicados a diversas superficies de recarga. Así, los recursos estimados de forma preliminar para una superficie de entre 181 y 207 km² han sido cuantificados entre 75 y 83 hm³, coherentes con las entradas calculadas por el método del balance de cloruros -80 hm³- y con las descargas medidas de agua subterránea (78 hm³).

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Convenio de Colaboración firmado entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). Es una contribución del Grupo RNM-308 de la Junta de Andalucía y al proyecto PID2019-111759RB-I00 de la Agencia Estatal de Investigación.

REFERENCIAS

- Alcalá, F.J., Custodio, E. (2014): Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in a large varied territory. *Hydrological Processes*, 28(2), 218-236. <https://doi.org/10.1002/hyp.9556>
- Allen, M. R., & Ingram, W. J. (2002): Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903), 224-232. <https://doi.org/10.1038/nature01092>
- Benavente, J., Pulido, A. y Fernández-Rubio, R. (1986): Les grandes caractères de l'hydrogéologie karstique dans les Cordillères Bétiques. *Karst et cavités d'Andalousie. Karstologie Memoires*, 87-99.
- CEHIUMA-IGME (2021): Delimitación, caracterización y evaluación de los recursos hídricos disponibles y comprometidos de las masas de agua subterránea de la Comunidad Autónoma de Andalucía, que se encuentran compartidas con dos o más ámbitos de planificación hidrológica. Informe técnico nº 7: Sierra de Segura. Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga - Instituto Geológico y Minero de España. 104 p.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983): Hidrología subterránea. 2ª edición. Ediciones Omega, Barcelona. 2350 p.
- Dabrio, C.J. (1972): Geología del sector del Alto Segura (zona Prebética). Tesis doctoral, Universidad de Granada, 388 p.
- Dabrio, C.J., García-Hernández, M., González-Donoso, J.M., Linares, A. (1975): Mapa Geológico de España 1:50000, hoja N° 908 (Santiago de la Espada). Mapa y memoria explicativa, IGME.
- Durán, J.J., López-Martínez, J., Vallejo, M. (1999): Distribución, caracterización y síntesis evolutiva del karst en Andalucía. En: Durán, J.J. y López-Martínez, J. (Eds.), *Karst en Andalucía*, 13-19. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid. 192 p.
- Ford, D.C. y Williams, P.W. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester (Reino Unido). 562 p. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Ferguson, G., & Gleeson, T. (2012): Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 2(5), 342-345. <https://doi.org/10.1038/nclimate1413>
- Fernández-Uría, A. y Navarro-Alvargonzález, A. (1989): Recursos hídricos del karst en España. En Durán, J.J. y López-Martínez, J. (Eds.), *El karst en España*, 335-345. Monografía nº4 de la Sociedad Española de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología. Madrid.
- 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.
- Hargreaves, G.H y Samani, Z.A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1, 96–99.

IGME (2001): Proyecto para la Actualización de la Infraestructura Hidrogeológica de las unidades 05.01. "Sierra de Cazorla", 05.02. "Quesada - Castril", 07.07. "Sierras de Segura - Cazorla" y carbonato de la Loma de Úbeda. Instituto Geológico y Minero de España. Informe inédito. 672 p. 5 tomos.

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

ITGE-UGR (1990): Investigación de los acuíferos carbonatados de las sierras de Cazorla y Segura. Instituto Tecnológico Geominero de España, Universidad de Granada. Informe inédito. 235 p.

López-Garrido, A.C. (1971): Geología de la Zona Prebética, Al NE. de la provincia de Jaén. (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.

López-Limia, B., López-Bermúdez, F. (1985): Tipos de lapiaz en un karst mediterráneo de montaña (Sierra de Segura, Jaén).

López-Limia, B. (1987): Geomorfología del karst de Pinar Negro (Sierra de Segura, Jaén). Lapiaz Monografía, 5–54.

Lupiani, E., Roldán-García, F.J. y Villalobos, M. (2007): Mapa y memoria explicativa de la hoja 929 (Canal de San Clemente). Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, Instituto Geológico y Minero de España, 91 p.

Moral, F. (2005): Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura) (Tesis Doctoral). Universidad Pablo de Olavide, Sevilla.

Moral, F., Cruz-Sanjulián, J. J., & Olías, M. (2008): Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 281-296. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.012>

Padilla, A., Delgado, J., Castillo, E., Rodríguez, L., Hernández-Bravo, J.A. y Fernández, M. (2013): Tratamiento y gestión de series temporales hidrogeológicas. Programa TRASERO v 2.5. Diputación Provincial d. Alicante, Alicante. 86 p.

Rodríguez-Estrella, T. (1982): Paleogeografía de la Zona Prebética durante el Cretácico. *CGI* 8, 615–633. (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.

Schoeller, H. (1962): *Les eaux souterraines*. Masson, París (Francia). 642 p.

Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.

Wood, W. W. (1999): Use and Misuse of the Chloride-Mass Balance Method in Estimating Ground Water Recharge. *Ground Water*, 37(1), 2-3. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb00949.x>