

Datación del agua del manantial de Meliones (provincia de Málaga) y su integración en un modelo hidrogeológico conceptual de carácter regional

Dating the groundwater drained by the Meliones spring (Málaga province) for integration into a regional hydrogeological conceptual model

J.M. Gil-Márquez¹, M. Mudarra¹, J.F. Martín-Rodríguez¹, F. Carrasco^{1,2}, L. Linares² y B. Andreo¹

1 Departamento de Ecología y Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, E-29071, Málaga. josemgil@uma.es, mmudarra@uma.es, josefrancisco@uma.es, fcarrasco@uma.es, andreo@uma.es

2 Academia Malagueña de Ciencias. C/Moratín 4, 1ºB, E-29015, Málaga. luislinares@telefonica.net

Resumen: El manantial de Meliones (provincia de Málaga) es una polisurgencia hipersalina asociada a la formación arcilloso-evaporítica del Trías de Antequera. Su drenaje natural deteriora la calidad química del agua embalsada en la presa del Guadalhorce, una de las fuentes de abastecimiento a la ciudad de Málaga. Algunos organismos públicos ejecutaron medidas correctoras con un enfoque muy local, centradas en la alteración de los procesos de infiltración rápida en el entorno inmediato al manantial, que no han solucionado el problema. Sin embargo, existen evidencias de que el Trías de Antequera es un sistema hidrogeológico complejo, en el que flujos rápidos localizados en los enclaves kársticos evaporíticos coexistirían con otros de tipo difuso. En este trabajo se ha datado el agua del manantial de Meliones con ³H, CFC-12 y ⁴He. Además, se han creado modelos de parámetros agregados que definen la distribución de edad de la muestra. Los resultados evidencian que la mayor parte del agua hipersalina drenada por la surgencia fue infiltrada hace más de un siglo. Esto confirma la existencia de un sistema regional con flujos jerarquizados donde flujos regionales lentos y de gran recorrido confluyen con otros rápidos y más cortos.

Palabras clave: datación de agua subterránea, karst evaporítico, Trías de Antequera, Meliones.

Abstract: *Meliones spring (Malaga province) is a brine outlet related to a clayey-evaporitic formation ("Trias de Antequera"). The groundwater drained by the spring salinizes the water dammed in the Guadalhorce reservoir, one of the supply source to the city of Malaga. So far, corrective actions were focused on the local scale, particularly in the modification of infiltration dynamics near the spring, but they did not fix the problem. However, there is some evidence that the "Trias de Antequera" is a complex hydrogeological system, in which diffuse flow and quick flows (within karst evaporite enclaves) would coexist. In this work, the groundwater drained by Meliones spring was dated based on ³H, CFC-12, and ⁴He. Additionally, lumped parameter models were developed to define the groundwater age distribution of the sample. Results prove that most of the groundwater drained by the spring was infiltrated more than a century ago. This confirms the existence of a hierarchically organized regional groundwater flow system where slow and long-distance regional flows converge in the spring with faster and shorter conduit flows.*

Key words: Groundwater dating, "Trias de Antequera", Meliones outlet, evaporite karst,

INTRODUCCIÓN

El manantial de Meliones es una polisurgencia que drena agua de elevada salinidad asociada al llamado Trías de Antequera (provincia de Málaga). Está situado en el estrecho de Gobantes, en la margen izquierda del río Guadalhorce (Fig. 1), bajo la cota de máximo embalse de la presa del Guadalhorce. Por esa razón, la surgencia queda inundada durante largos periodos. El aporte salino medio de este manantial al río Guadalhorce en el periodo 1981-2003 se estimó en 470 Tm/día. Ello produce un deterioro de la calidad química del agua embalsada por la presa, que presenta un contenido medio de NaCl del orden de 4-8 g/l (Mudarra et al., en prensa), lo que impide su uso para el abastecimiento urbano sin un tratamiento previo de desalobración. Igualmente, el uso del agua para regadío se ve comprometido en los momentos en los que la concentración de sal en el agua del embalse es mayor.

Durante las últimas cinco décadas, varios organismos han investigado este problema, pero, a pesar del tiempo transcurrido desde la puesta en funcionamiento de la presa (1976) y del capital público destinado, aún no se ha alcanzado una solución eficaz que reduzca el vertido de aguas altamente salinas al embalse. Entre las actuaciones realizadas se incluye el sellado de formas de infiltración preferencial (sumideros kársticos) en las proximidades del área de descarga, con idea de impedir la alimentación del sistema (Guzmán del Pino, 2003). El objetivo no se cumplió, pues la rápida dinámica geomorfológica del karst evaporítico favoreció la aparición de nuevas formas que favorecen la infiltración. Otra de las medidas consistió en captar el agua subterránea salada mediante sondeos y conducirla hacia el mar (SGOP, 1993). Todas las medidas correctivas desarrolladas hasta la fecha se han centrado en abordar el problema a escala local, sin considerar ni comprender el funcionamiento hidrogeológico del Trías de Antequera en su conjunto.

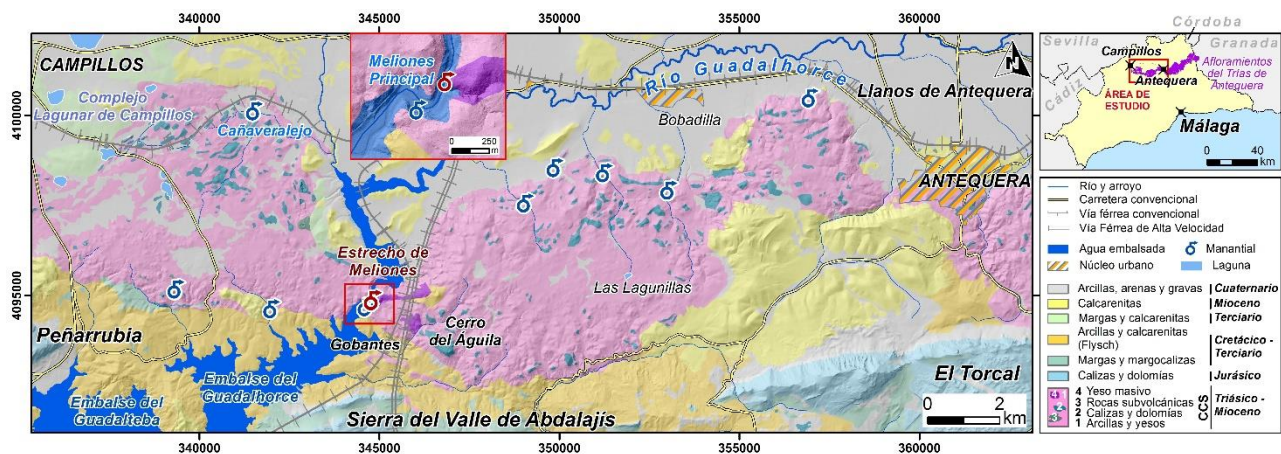


FIGURA 1. Localización geográfica y esquema geológico del área de estudio. En el recuadro rojo se representa en detalle la ubicación del manantial de Meliones en la que se llevó a cabo el muestreo.

Trabajos recientes (Andreo et al., 2016; Gil-Márquez et al., 2020; Mudarra et al., *en prensa*) evidencian que la situación de los manantiales y humedales en los afloramientos del Trías de Antequera y formaciones afines, y las características físico-químicas de sus aguas, forman parte de un sistema hidrogeológico regional en el que también intervienen flujos por conductos. La evolución geoquímica de las aguas subterráneas estaría determinada por el tiempo de interacción del agua con las rocas, además de por las litologías predominantes.

El objetivo de este trabajo es determinar la edad aparente del agua drenada por el manantial de Meliones, usando técnicas de datación basadas en ^3H , ^4He y CFC-12 (CCl_2F_2). Además, la disponibilidad de datos de concentración de diferentes trazadores ambientales permite elaborar modelos de mezcla que proporcionan una distribución de edad de la muestra; es decir, asignar distintas edades (o rangos de edades) a diferentes fracciones que constituyen la muestra. Los resultados alcanzados han sido integrados en el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del Trías de Antequera, propuesto en trabajos previos. Este conocimiento ayudará a reorientar las posibles actuaciones de remediación.

ÁREA DE ESTUDIO

Bajo la denominación “Trías de Antequera” se incluye al conjunto de materiales que se extienden, en dirección E-O, por la parte centro-septentrional de la provincia de Málaga (Fig. 1), y que han sido diferenciados por Sanz de Galdeano *et al.* (2008) del resto de los llamados Complejos Caóticos Subbéticos (CCS) de la Zona Externa de la Cordillera Bética. En conjunto se trata de una megabrecha con una estructura interna caótica, en la que hay un amplio predominio de litologías triásicas de facies germano-andaluza, pero que además contiene bloques de otros materiales (calizas, dolomías, margocalizas, margas y areniscas) de edades Triásico - Terciario. Parte de estos materiales están cubiertos discordantemente por sedimentos postorogénicos del Mioceno Superior y del Cuaternario de la Vega de Antequera y Llanos de Campillos (Fig. 1). El área de estudio, el sector de Meliones-Gobantes, abarca la mitad occidental de los afloramientos del Trías de Antequera (~100 km², Fig. 1).

La elevada solubilidad de las rocas evaporíticas del Trías de Antequera (yeso, anhídrita y halita) favorece los procesos de disolución y karstificación. Ello ha dado lugar a uno de los paisajes kárstico-evaporíticos más singulares de España, con abundantes formas, tanto exo- como endokársticas: depresiones, colapsos, dolinas, simas y cuevas (Calaforra y Pulido-Bosch, 1999). La situación y abundancia de estas formas vienen en parte determinadas por la existencia de estructuras halocinéticas subcirculares, que destacan en el relieve como altiplanos, separados unos de otros por cañones fluvio-kársticos, como el formado por el río Guadalhorce a su paso por el estrecho de Meliones (Fig. 1). Sin embargo, las geoformas más comunes en el área de estudio son las depresiones kársticas, algunas de las cuales presentan sumideros kársticos, que se activan durante los periodos de lluvia. Por el contrario, donde no existen sumideros, las depresiones pueden permanecer inundadas de forma temporal o permanente, lo que origina humedales.

A los materiales del Trías de Antequera y del resto de los CCS se les ha atribuido tradicionalmente un funcionamiento propio de un acuitardo, debido al predominio de litologías de baja permeabilidad (arcillas, areniscas). Sin embargo, allí donde los enclaves evaporíticos adquieren mayor desarrollo, la permeabilidad aumenta y el medio adquiere rasgos de acuífero de tipo kárstico. Todo ello confiere al conjunto arcilloso-evaporítico cierta complejidad hidrogeológica, similar a la que se podría encontrar en un sistema en el que coexistirían flujos jerarquizados de diferentes longitudes y a distintas escalas, desde las áreas de recarga hasta las zonas de descarga (Andreo et al., 2016). En cualquier caso, estos sistemas se alimentan por infiltración directa del agua de lluvia y también de la escorrentía a través de sumideros kársticos, mientras que la descarga tiene lugar por manantiales, hacia cauces fluviales o hacia humedales.

El drenaje subterráneo en el área de estudio se produce sobre todo hacia el estrecho de Meliones (río Guadalhorce), donde hay varias surgencias salinas (Fig. 1), situadas entre 345 y 353 m s.n.m.; la cota más baja de cuantos manantiales existe en el Trías de Antequera. El valor medio de descarga conjunta de todas ellas es 20-45 l/s. La conductividad eléctrica del agua varía entre 90 y

200 mS/cm, y las facies hidroquímicas son del tipo clorurada-sódica (Carrasco, 1986). El CEDEX realizó algunas campañas de medición de ^3H en el entorno de Meliones (Baonza et al., 1997). Los resultados dieron lugar a distintas interpretaciones. Así, Carrasco (1986) dedujo que el agua del manantial tenía en parte un origen pre-nuclear, mientras que Guzmán del Pino (2003) concluyó que se trataba de una mezcla de aguas con menos de una década desde su infiltración.

MÉTODOS

En noviembre de 2017, coincidiendo con que el nivel del embalse se encontraba por debajo de la cota del manantial, se tomaron muestras de agua para su datación. Para el análisis de ^3H la muestra se tomó directamente desde el manantial. Para determinación de gases, el agua fue muestreada en cilindros de cobre (He) y en botellas de acero inoxidable con doble apertura (CFC-12). La determinación analítica se llevó a cabo en el Instituto de Física Ambiental de la Universidad de Bremen. El análisis de ^3H se realizó según en el método de incubación de ^3He . Los isótopos de He se determinaron mediante espectrometría de masas y el CFC-12 con cromatografía de gases. La concentración de CFC-12 (pmol/kg) fue transformada a concentración atmosférica (pptv), de acuerdo con sus condiciones de recarga (17°C, 650 m s.n.m. y agua dulce). La descripción detallada de los procedimientos metodológicos de muestreo y análisis se recoge en Gil-Márquez et al. (2020).

A partir de los resultados, se generaron distintos modelos de parámetros agregados, con ayuda del programa TracerLPM (Jurgens et al., 2012). Con los datos de ^3H y CFC-12 se crearon modelos simples. Los resultados de dichos modelos, junto con los valores de ^4He , sirvieron para modelos binarios, en los que se simuló una mezcla entre una fracción joven de agua (con ^3H y CFC-12) y otra antigua (sin ^3H ni CFC-12). Los modelos empleados fueron los de dispersión (DM), de pistón exponencial (EPM) y de mezcla binaria entre dos modelos de flujo pistón (PFM), dos DM y dos EPM (véase Jurgens et al., 2012).

RESULTADOS

En la tabla I se recogen los resultados analíticos y su interpretación en términos de datación. El contenido de ^3H de la muestra es 1.14 UT (1 UT = 0,119 Bq/kg de H_2O). El agua infiltrada a partir de 1953, tras la liberación antropogénica de ^3H como consecuencia de los ensayos termonucleares, tendría más de 2 UT, de acuerdo con la

función de ^3H en precipitación en el S de España escalada a 2018 (Gil-Márquez et al., 2020). Por tanto, la muestra estaría constituida por una fracción de agua moderna (con ^3H) y otra antigua, infiltrada antes de 1953 (sin ^3H).

Según las condiciones de recarga consideradas, la concentración de CFC-12 en la muestra (0,3 pmol/kg) equivale a una concentración atmosférica de 82,6 pptv (Tabla I). Dicho valor se registró en la atmósfera del hemisferio norte en el año 1966, de forma que la edad aparente de la muestra sería 52 años. No obstante, según los datos de ^3H , la concentración de CFC-12 en la muestra estaría diluida por la existencia de una fracción antigua, por lo que la edad de la fracción moderna (que es la que aporta el CFC-12) sería menor.

^3H (UT)	CFC-12		Edad aparente CFC-12 (años)	$^4\text{He}_{\text{rad}}$ ($\text{cm}^3\text{STP/kg}$)	Edad aparente $^4\text{He}_{\text{rad}}$ (años)
	pmol/kg	pptv			
1,14	0,3	82,6	52	$1,2 \cdot 10^{-3}$	2.300

TABLA I. Resultados analíticos de la muestra de agua del manantial de Meliones y su interpretación en términos de edad aparente

La muestra del manantial presenta un contenido en $^4\text{He}_{\text{rad}}$ de $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3\text{STP/kg}$ (Tabla I). La datación con $^4\text{He}_{\text{rad}}$ depende de la tasa de acumulación de este gas en las aguas subterráneas, que puede variar hasta dos órdenes de magnitud, dependiendo del contenido en U y Th en el medio. Gil-Márquez et al. (2020) estimaron una tasa de acumulación de $^4\text{He}_{\text{rad}}$ de $5,2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3\text{STP/g-año}$ en otros manantiales del Trías de Antequera. Según ese valor, la edad aparente de $^4\text{He}_{\text{rad}}$ del agua sería de 2.300 años (Tabla I). No obstante, el cálculo debe ser tomado con precaución, pues existen numerosas incertidumbres asociadas a la determinación de este gas en aguas salinas (Gil-Márquez et al., 2020). Lo que sí es evidente es que la fracción de agua antigua drenada por el manantial de Meliones tiene una edad elevada. De hecho, según la tasa de acumulación más alta encontrada en literatura por Gil-Márquez et al. (2020), de $1,2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3\text{STP/g-año}$, la menor edad aparente del $^4\text{He}_{\text{rad}}$ posible sería de 630 años.

Los modelos de parámetros agregados con los que se consiguió un mejor ajuste son los que se indican en la tabla II. Las edades medias de la muestra según los modelos simples son 148 y 289 años (EPM y DM, respectivamente). Con los modelos binarios, la edad resultante es del orden de 2300 años (Tabla II), debido a que incorporan también el $^4\text{He}_{\text{rad}}$. Los tres modelos binarios determinan que la fracción de agua joven está comprendida entre 41,8 y 43,4 %. Pese a que los modelos

Modelo	Edad media (años)	Edad mediana – GA_{50} (años)	Trazadores utilizados	Modelo simple	Mezcla binaria				
				Parámetro del modelo	Edad media F_j	Parámetro F_j	% F_j	Edad F_v	Parámetro F_v
EPM	148	109	^3H , CFC-12	0,15	-	-	-	-	-
DM	289	124	^3H , CFC-12	1,43	-	-	-	-	-
EPM-EPM	2291	960	^3H , CFC-12, $^4\text{He}_{\text{rad}}$	-	59	0,7	43,4	4000	0,15
DM-DM	2307	491	^3H , CFC-12, $^4\text{He}_{\text{rad}}$	-	57	0,17	42,9	4000	1,4
PFM-PFM	2348	4000	^3H , CFC-12, $^4\text{He}_{\text{rad}}$	-	46	-	41,8	4000	-

TABLA II. Descripción y resultados obtenidos de la aplicación de distintos modelos de parámetros agregados. F_j , Fracción joven; F_v , fracción vieja

simples no determinan el porcentaje de cada una de las que la edad mediana (acumulación del 50%) se alcanza después de 100 años (Fig. 2), por lo que la fracción joven es inferior al 50%. Además, en todos los modelos el agua de menos de 10 años está prácticamente ausente y el agua de menos de 40 años tan sólo supone un 20%.

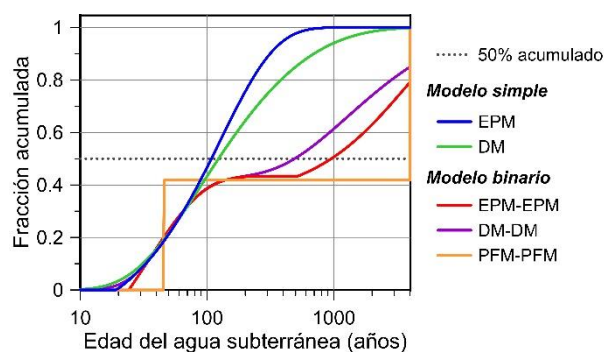


FIGURA 2. Distribución de edad de la muestra de agua del manantial de Meliones, según los distintos modelos aplicados. Se incluye la línea a la que se acumula el 50% de la muestra (edad mediana).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el agua drenada por el manantial de Meliones en noviembre 2017 fue mayoritariamente infiltrada hacía varias décadas e incluso, buena parte tendría más de un siglo. El uso conjunto de varios trazadores ambientales corrobora la interpretación de Carrasco (1986) sobre la presencia de aguas con distinta edad en el drenaje del manantial de Meliones. Ello contradice claramente la idea de que las surgencias salinas estarían asociadas únicamente a la recarga que tiene lugar a través de los sumideros kársticos que hay en su entorno. No obstante, las respuestas naturales del manantial a los eventos de recarga son más o menos rápidas y sus variaciones hidroquímicas denotan la existencia de un marcado desarrollo de la karstificación en la zona no saturada, lo que favorece la entrada y el flujo rápido de agua menos mineralizada hacia la zona saturada (Mudarra et al., en prensa).

Todo ello estaría en consonancia con el modelo hidrogeológico conceptual propuesto por Andreo et al. (2016) para los afloramientos de los CCS, incluido el del Trías de Antequera. Según el modelo, flujos lentos, profundos, ascendentes y de mayor tiempo de residencia en el medio, se mezclarían con otros rápidos de agua menos mineralizadas y que discurren a través de los conductos de la zona no saturada. Asimismo, la salinidad de los manantiales asociados a los afloramientos de los CCS está muy relacionada con el tiempo de residencia del agua subterránea en el medio, pero que la karstificación, localmente, puede modular las respuestas naturales (Gil-Márquez et al., 2020).

Por tanto, el agua hipersalina del manantial de Meliones debe guardar relación con flujos regionales de gran tiempo de residencia en el medio. La karstificación puede producir variaciones hidrodinámicas en el manantial y podría modificar la distribución de edad del agua drenada en cada momento y, en consecuencia, su salinidad. Así pues, las medidas correctoras que se planteen no pueden ir encaminadas a reducir el drenaje

del manantial, pues el flujo de agua se origina en gran parte en una escala regional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución del Grupo de investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía a los Proyectos de Excelencia RNM-8087 y RNM-6895R de la Junta de Andalucía. Los autores agradecen la colaboración del Dr. J. Sültenfuß de la Univ. de Bremen. Inscripción al congreso financiada por la Universidad de Málaga.

REFERENCIAS

- Andreo, B., Gil-Márquez, J.M., Mudarra, M., Linares, L. y Carrasco, F. (2016): Hypothesis on the hydrogeological context of wetland areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaén provinces, Southern Spain). *Environ. Earth Sci.*, 75(9): 1–19.
- Baonza, E., Plata, A. y Escolano, A. (1983): *Estudio sobre procedencia y comportamiento del agua del manantial salino de Meliones en el embalse del Guadalhorce (Málaga)*. CEDEX, inédito.
- Calaforra, J.M. y Pulido-Bosch, A. (1999): Gypsum karst features as evidence of diapiric processes in the Betic Cordillera, Southern Spain. *Geomorphology*, 29(3–4): 251–264.
- Carrasco, F. (1986): *Contribución al conocimiento de la cuenca alta del río Guadalhorce: el medio físico. Hidrogeoquímica*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 435 p.
- Gil-Márquez, J.M., Sültenfuß, J., Andreo, B. y Mudarra, M. (2020): Groundwater dating tools (^3H , ^3He , ^4He , CFC-12, SF_6) coupled with hydrochemistry to evaluate the hydrogeological functioning of complex evaporite-karst settings. *J. Hydrol.*, 580:124263.
- Guzmán del Pino, J.L. (2003): *Estudio hidrogeológico, edáfico y de contaminación salina en la cuenca media del río Guadalhorce*. Tesis Doct. Univ. Granada.
- Jurgens, B.C., Böhlke, J.K. y Eberts, S.M. (2012): TracerLPM (Version 1): *An Excel® workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data*. Techniques and Methods, USGS, 60 p.
- Mudarra, M., Gil-Márquez, J.M., Andreo, B., Carrasco, F. y Linares, L. (en prensa): Funcionamiento hidrogeológico del Trías de Antequera. Hipótesis sobre el modelo general de flujo subterráneo. *Bol. Geol. Min.*, 131 (2).
- Sanz de Galdeano, C., Lozano, J.A. y Puga, E. (2008): El “Trías de Antequera”: Naturaleza, origen y estructura. *Rev. Soc. Geol. Esp.*, 21(3): 111–124.
- SGOP (1993): *Prueba experimental de captación de las salmueras surgentes al embalse del Guadalhorce (Málaga)*. Servicio General de Obras Públicas. Informe inédito.