

HIDROGEOLOGÍA DEL TRÍAS DE ANTEQUERA. EL MANANTIAL DE MELIONES

Francisco Carrasco Cantos

Discurso de ingreso como Académico de Mérito, 11 de enero de 2018

Excmo. Sr. Presidente de la Academia Malagueña de Ciencias, Ilmos. Sres. Académicos, señoras, señores.

Quiero que mis primeras palabras en esta Academia sean de agradecimiento. Es para mí una enorme satisfacción incorporarme a esta Institución conocida por su extensa trayectoria científica y cultural. Les transmito mi compromiso personal y experiencia profesional para colaborar en el desarrollo de los fines que se establecen en los estatutos de esta Corporación.

Debo expresar especialmente mi reconocimiento a los académicos que han propuesto mi candidatura. En primer lugar, a D. Luis Linares Girela con quien me une una larga amistad desde los tiempos de nuestros estudios de Geología en la Universidad de Granada. A D. Juan Antonio Rodríguez Arribas con quien colaboré desde el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas y a D. Emilio

Ferre Bueno, compañero de la Universidad de Málaga. Asimismo, agradezco la presencia de aquellos que hoy nos acompañan en este acto. Gracias a todos.

El tema que he elegido para esta disertación trata de la hidrogeología del Trías de Antequera y especialmente sobre el manantial salino de Meliones, uno de los manantiales más importantes de la provincia, por su repercusión en la calidad natural de las aguas de la región e incidencia en el abastecimiento de agua a la ciudad de Málaga.

INTRODUCCIÓN

Bajo la denominación de Trías de Antequera se conoce al afloramiento de materiales triásicos que se extiende, siguiendo una franja de dirección E-W, por el norte de la provincia de Málaga (Fig. 1).

Desde el punto de vista geológico esta región se encuentra localizada en el sector

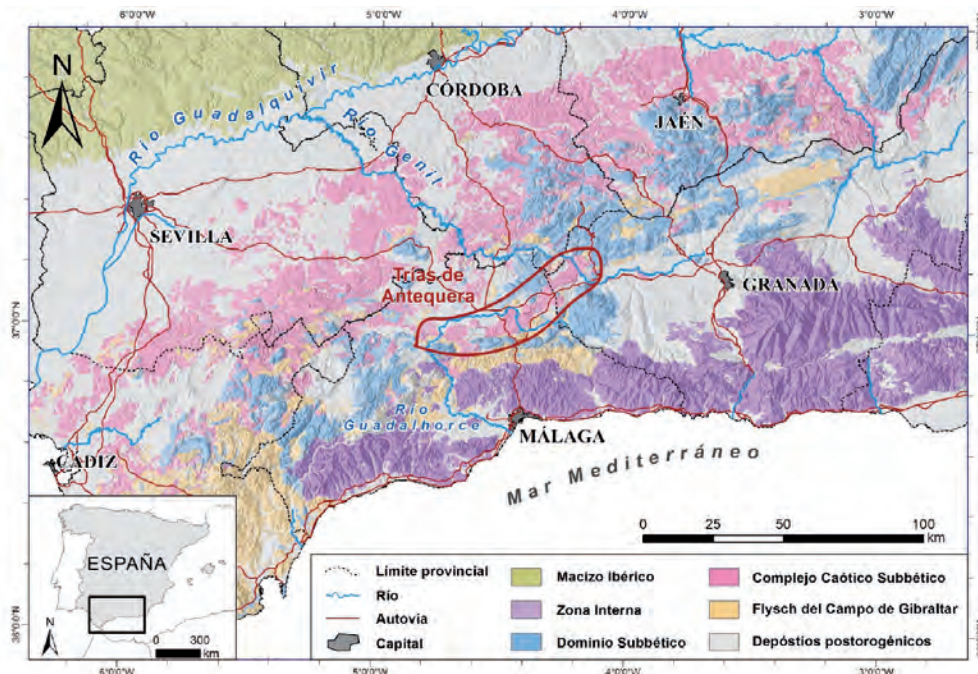


Figura 1. Situación del Trías de Antequera.

centro-occidental de la Cordillera Bética, donde afloran unidades geológicas pertenecientes a los dominios Subbético Interno y Medio dentro de la Zona Externa de dicha cordillera.

El límite sur del Trías de Antequera, en el sector occidental está formado por la alineación montañosa de las sierras del Valle de Abdalajís y del Torcal de Antequera y en el sector oriental, por las sierras de las Cabras, Camarolos, del Jobo, San Jorge y Gibalto que constituyen la Alta Cadena. Por el norte y este, los afloramientos del Trías de Antequera están cubiertos de manera discordante por sedimentos postorogénicos del Mioceno superior y del Cuaternario de la Vega de Antequera (Fig. 2). Más hacia el norte, los materiales triásicos se extienden ampliamente en la provincia de Córdoba, formando parte del Subbético Medio.

Los materiales triásicos están constituidos principalmente por un conjunto de arcillas y areniscas de colores rojos y verdes entre las que se intercalan concentraciones estratiformes o irregulares de rocas evaporíticas, calizas dolomíticas y ofitas. Las rocas evaporíticas (yeso y sal gema) tienen una gran incidencia en el tema que nos ocupa, el yeso generalmente,

se presenta masivo y, a veces, se encuentra en forma de brecha poligénica constituida por fragmentos de yeso con pequeñas proporciones de arcillas, calizas y dolomías, cuyo origen puede estar asociado a resedimentaciones de tipo tectosedimentario. La sal gema no aflora en la superficie, aunque puede estar diseminada entre las arcillas y, además, deben existir grandes acumulaciones de esta roca evaporítica, porque hay manantiales y lagunas cuyas aguas presentan alta salinidad, con elevados contenidos en cloruro sódico (CARRASCO 1986; CALAFORRA 1998).

La estructura geológica del Trías de Antequera es caótica y desorganizada. Los materiales muestran un significativo grado de plegamiento y brechificación, fruto de las fases más activas de la orogenia alpina que se produjeron durante el Mioceno. Se trata de materiales alóctonos pertenecientes al denominado Complejo Caótico Subbético, en los que hay un amplio predominio de litologías triásicas pero que contienen, además, olistolitos y bloques postríasicos de otras unidades béticas, a veces incluidos en sedimentos del Mioceno medio (PEYRE 1974; PÉREZ-LÓPEZ 1991; SANZ DE GALDEANO *et al.* 2008).

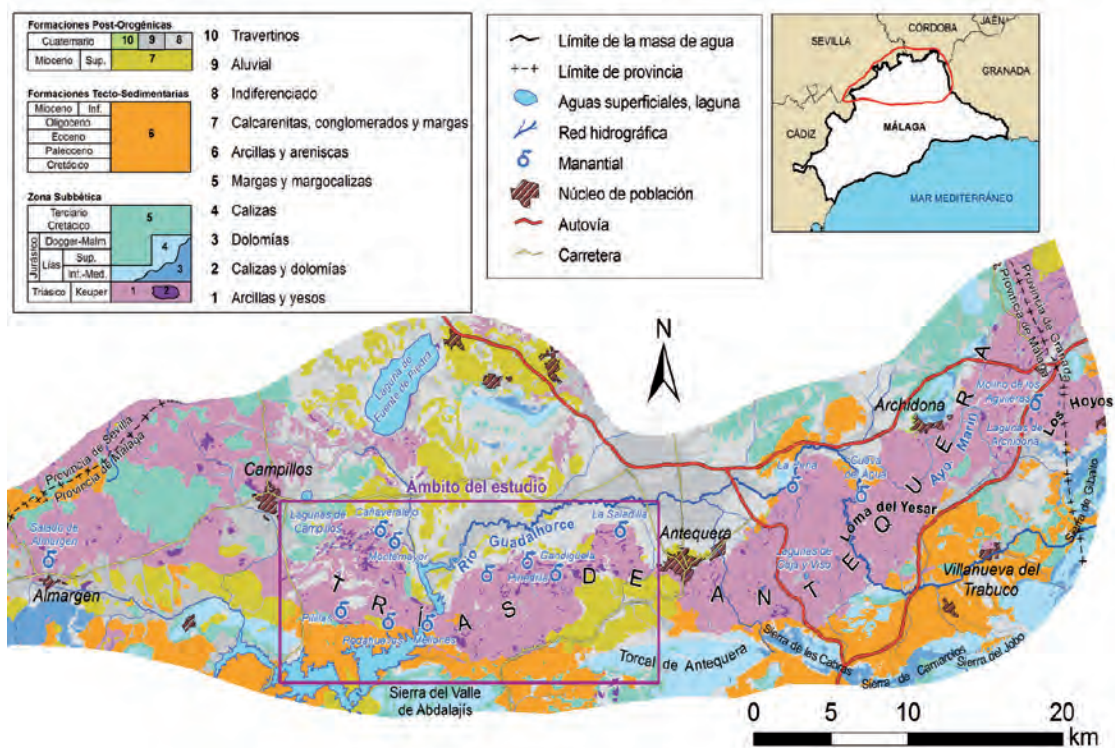


Figura 2. Características geológicas del Trías de Antequera. En recuadro rojo el sector de Meliones. Modificado de CARRASCO, DURAN & CALAFORRA (2007).

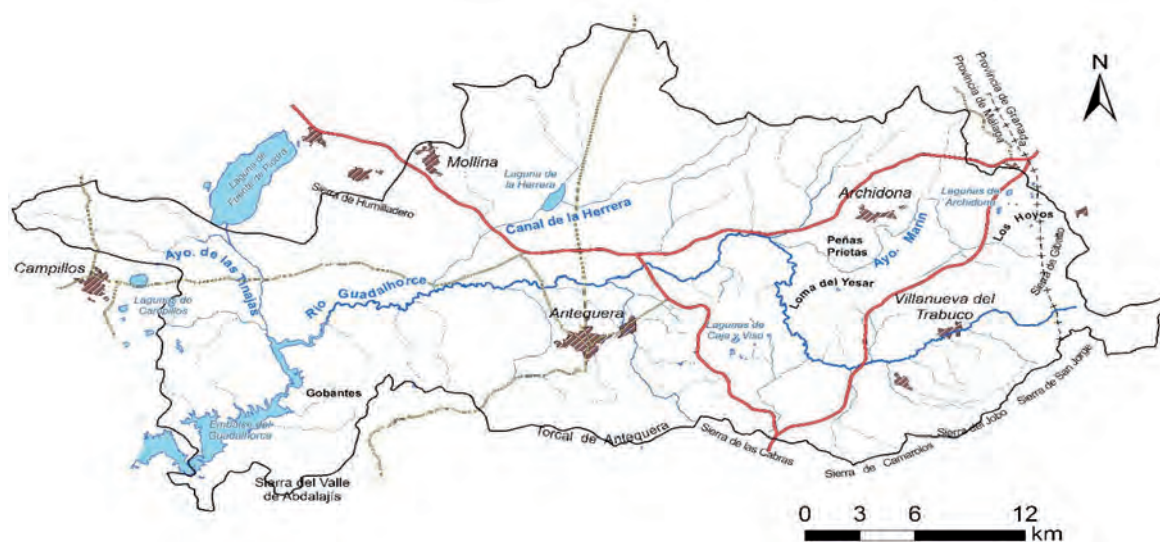


Figura 3. Hidrografía de la región del Trías de Antequera.

La red hidrográfica regional está constituida, fundamentalmente, por el río Guadalhorce que recorre la zona de este a oeste (Fig. 3). En el tramo final de su cuenca alta, antes de atravesar el Tajo de los Gaitanes, recibe las aportaciones de los ríos Guadalteba y Turón, procedentes de la Serranía de Ronda. En el entorno de la unión de los tres ríos se construyó en primer lugar la presa del Conde del Guadalhorce sobre el río Turón y posteriormente las presas del Guadalhorce y del Guadalteba en cada uno de estos ríos que en aguas altas forman un solo embalse. A este conjunto se le denomina “Los embalses del Guadalhorce”, cuyas aguas se utilizan para regadíos y para el abastecimiento ciudad de Málaga.

Las primeras investigaciones acerca de la calidad de las aguas del río Guadalhorce realizadas en las décadas de 1960 y 1970 (CATALÁN *et al.* 1967; ESCOLANO 1974; PLIEGO 1976) mostraron la alta salinidad que presentaban las aguas del río en una estación de aforos cercana a la zona de Gobantes, que posteriormente quedó inundada por el embalse.

Por entonces, mediante muestreos en una serie de puntos del río desde su nacimiento hasta el embalse del Guadalhorce, se pusieron de manifiesto las variaciones de salinidad de las aguas de escorrentía y su relación con los materiales de la cuenca vertiente. Se constató que el mayor aumento de salinidad se producía en el estrecho de Meliones, debido

a la existencia de un manantial muy salino (CARRASCO 1978, 1986).

El Trías de Antequera aflora en una altiplanicie ligeramente inclinada hacia el oeste, desde la cota 800 m s.n.m., en la parte oriental, a 600 m s.n.m., en la occidental. El relieve presenta una pendiente moderada y está caracterizado por la existencia de lomas, vaguadas y abundantes depresiones cerradas endorreicas. La altiplanicie, está cortada por dos cañones originados por el río Guadalhorce, situados respectivamente en las Lomas del Yesar, en el término municipal de Archidona, y en el estrecho de Meliones, en el sector de Gobantes.

En el Trías de Antequera se encuentra uno de los complejos kársticos desarrollados sobre materiales evaporíticos más importantes de España (MOLINA 1982; DURÁN & MOLINA 1986). Existen numerosas formas del modelado, tanto exo como endokársticas: campos de lapiaz, dolinas, simas y cuevas. Son frecuentes las cuevas en yesos, entre las que destacan la Sima del Águila en la región de Gobantes, cerca del estrecho de Meliones y la Cueva del Agua en las Lomas del Yesar.

Las rocas triásicas arcillosas y evaporíticas determinan la geomorfología de estas áreas, debido a los procesos de disolución de los materiales evaporíticos solubles que originan conductos y cavidades kársticas inestables, con el posterior desarrollo de procesos de colapso,

hundimiento y subsidencia, cuyo resultado es la aparición de depresiones endorreicas en superficie (dolinas, uvalas y poljes), lugares propicios para la formación de lagunas.

Algunos ejemplos de humedales de origen kárstico-evaporítico se pueden reconocer, de este a oeste, en el paraje de Los Hoyos, en el extremo oriental de la provincia; en las Lomas del Yesar y Peñas Prietas en el sector de Archidona; las lagunas de Caja y Viso en el término municipal de Antequera; pequeñas cuencas del sector de Gobantes y en las inmediaciones de Campillos. Más al norte, se desarrolla la cuenca endorreica de la laguna de Fuente de Piedra, de grandes dimensiones, en comparación con las citadas.

Otros rasgos geomorfológicos visibles en el Trías de Antequera están principalmente determinados por procesos halocinéticos (movimientos verticales de materiales evaporíticos, de baja densidad), así como por los sistemas de fracturas asociados a ellos, que originan estructuras diapíricas con forma subcircular. Estas estructuras destacan claramente en el relieve, pues constituyen domos y altiplanos separados unos de otros por la red fluvial (CALAFORRA 1998).

CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO DE LOS MATERIALES DEL TRÍAS

Entre la depresión del Guadalquivir y el frente de la Zona Externa de la Cordillera Bética existe un extenso afloramiento de materiales

pertenecientes al Complejo Caótico Subbético. En este territorio son relativamente frecuentes humedales, lagunas y manantiales, todos ellos en distintas situaciones geomorfológicas: en áreas de divisoria, en zonas próximas a los cauces y también en posiciones intermedias.

En su conjunto, estos materiales se caracterizan por tener una baja permeabilidad, sobre todo donde los enclaves arcillosos son más abundantes. No obstante, a veces, la permeabilidad se ve incrementada gracias a la fracturación y a los procesos de disolución de las evaporitas, que originan depresiones, sumideros y simas las cuales constituyen zonas de infiltración preferencial y conductos de tipo kárstico que favorecen la circulación rápida del agua subterránea.

Las observaciones realizadas por investigadores del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, en diferentes áreas de la Cordillera Bética, especialmente en las provincias de Córdoba, Jaén y Málaga (JUNTA DE ANDALUCÍA & GHUMA 2005; ANDREO *et al.* 2016), ponen de manifiesto que existe un flujo de aguas subterráneas desde las regiones topográficamente más altas, que constituyen zonas de recarga, hacia las regiones más bajas, donde se encuentran humedales, lagunas de descarga y manantiales asociados a flujos subterráneos regionales. Entre ambos extremos encontramos humedales y manantiales que hemos denominado de tránsito (Fig. 4).

En las zonas de recarga se encuentran lagunas con aguas de baja salinidad, poco

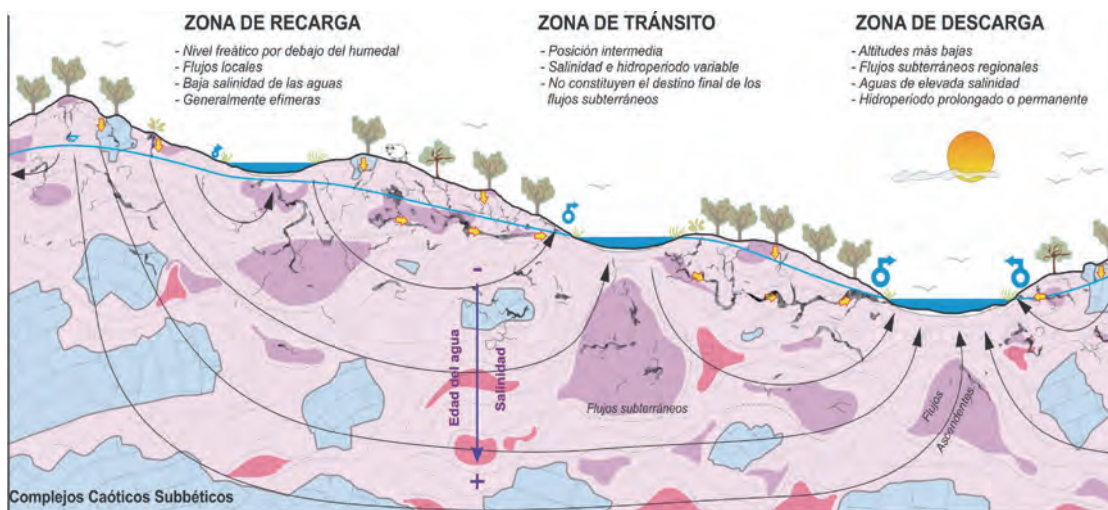


Figura 4. Modelo de funcionamiento hidrogeológico del Trías (ANDREO *et al.*, 2016).

permanentes en el tiempo, asociadas a flujos de agua subterránea locales de escasa profundidad, mientras que en las zonas de descarga existen lagunas de aguas más saladas y de mayor tiempo de permanencia. En estas zonas de descarga se encuentran manantiales en cuya alimentación participan los flujos subterráneos de mayor recorrido y más profundos con aguas de mayor salinidad (a veces también con mayor temperatura) y un funcionamiento más prolongado en el tiempo, que hace que incluso no se agoten en periodos de sequía.

También hay lagunas y surgencias de agua localizadas en una posición intermedia entre las zonas de recarga y descarga, son denominadas zonas de tránsito, debido que no constituyen el último destino de los flujos subterráneos que se dirigen hacia surgencias localizadas a cotas más bajas. En estas zonas intermedias se encuentran lagunas y manantiales alimentados por flujos subterráneos de tránsito entre las áreas de recarga y descarga cuyas aguas suelen presentar menores valores de salinidad.

El modelo de flujo general planteado se asemeja al propuesto por J. TOTH (1970) para grandes cuencas sedimentarias. Sin embargo, en el modelo aquí presentado existen algunas variaciones debido a la heterogeneidad y la singularidad de los medios kárstico-evaporíticos.

En relación con la composición química de las aguas subterráneas del Trías de Antequera existen principalmente dos tipos de facies hidroquímicas: sulfatada cálcica y clorurada sódica. Las aguas sulfatadas cálcicas son las más comunes, contienen de 2 a 3 g/l de sales totales disueltas, en su mayor parte sulfato cálcico procedente de la disolución de los yesos. Las aguas de tipo clorurada sódica se originan a partir de la disolución de sal gema. Con esta facies hidroquímica existen alrededor de media docena de manantiales, entre ellos los de Meliones y Cañaveralejo. El agua de estas surgencias tiene una salinidad alta, que puede hasta triplicar la salinidad del agua del mar.

EL MANANTIAL DE MELIONES

El manantial de Meliones es el de mayor caudal y salinidad de las surgencias asociadas al Trías de Antequera. Está situado en el estrecho del mismo nombre, en la margen izquierda del río Guadalhorce (Fig. 5). Se encuentra a la cota 345 m s.n.m., la más baja

de todos los manantiales que drenan el Trías de Antequera.

La identificación de una serie de aportaciones de aguas altamente salinas procedentes del Trías de Antequera al embalse del Guadalhorce fue el motivo por el que se realizaron numerosos estudios sobre su origen. Varios organismos públicos llevaron a cabo investigaciones para su conocimiento y para la puesta en práctica de soluciones destinadas a erradicarlo. Entre los organismos cabe destacar la Confederación Hidrográfica del Sur, la Comisaría de Aguas del Sur, el Servicio del Geológico del Ministerio de Obras Públicas y el Centro de Experimentación de Obras Públicas. La mayor complicación estriba en que la principal surgencia de agua salada está situada bajo la cota de máximo embalse y queda inundada durante largos periodos de tiempo.



Figura 5. El Manantial de Meliones.

Los muestreos realizados en las aguas del manantial desde agosto de 1974 hasta su inundación por el embalse del Guadalhorce a partir de finales del año 1976 (CARRASCO 1979; ESCOLANO & CONEJO 1981), pusieron de manifiesto que el régimen de descarga era permanente, con un caudal variable entre 2 y 20 l/s y con una alta concentración de cloruro sódico. Mediante aforos y análisis químicos en diferentes secciones del río, en el entorno del manantial, se comprobó la existencia de otras surgencias salinas.

La salinidad media del manantial durante el periodo de control antes citado fue de 71 g/l, el doble de sales que tiene el agua del mar, con un coeficiente de variación relativamente bajo. La alta salinidad de este manantial está ocasionada por el cloruro sódico procedente de la disolución de sal gema del Trías.

El estudio de los resultados obtenidos puso de manifiesto que, en períodos de estiaje, el caudal y la salinidad del agua del manantial permanecen casi constantes, mientras que en los periodos de recarga hay un claro aumento de su caudal y de la salinidad. Posteriormente, tras el cese de las lluvias, el caudal desciende y la salinidad se mantiene elevada durante más tiempo, unos dos meses.

La interpretación de la información disponible permite proponer un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del Trías de Antequera para el sector de Meliones (ANDREO *et al.* 2016). En él se integran distintos flujos subterráneos de longitudes, escalas y profundidades diferentes (Fig. 6):

- Existen unos flujos locales superficiales de corto recorrido que provienen de la infiltración del agua de lluvia en los afloramientos del Trías cercanos al manantial.

- Hay otros flujos intermedios de mayor recorrido que se desarrollan principalmente a lo largo de la red kárstica, por ejemplo, los procedentes de la Sima del Águila y otras del entorno.

Estos flujos se manifiestan en periodos lluviosos, el agua subterránea tiene una velocidad de circulación rápida, su mineralización no es elevada (con predominio de los sulfatos) y producen en el manantial importantes incrementos de caudal.

- Finalmente, existen otros flujos más profundos y con mayor tiempo de residencia que tendrían su origen en zonas alejadas del manantial. En su recorrido, adquirirían gradualmente mayor mineralización y temperatura hasta su convergencia en el estrecho de Meliones. Estos flujos de aguas muy salinas, de facies clorurada sódica, se manifiestan principalmente en periodos alejados de los eventos de lluvias y en épocas de sequía en las que el manantial sigue aportando salmueras.

El comportamiento hidrogeológico indicado para el Trías de Antequera es aplicable a otros afloramientos del Complejo Caótico Subbético, donde es posible reconocer la existencia de diferentes flujos de agua subterránea, convergentes hacia humedales y manantiales salinos situados en los lechos de los ríos Anzur y Genil en la provincia de Córdoba o el arroyo Salado en la provincia de Jaén, por citar sólo algunos ejemplos (JUNTA DE ANDALUCÍA & GHUMA 2005).

APORTACIONES SALINAS AL EMBALSE DEL GUADALHORCE

La aportación salina procedente de las surgencias del Trías en el estrecho de Meliones, antes de su inundación por el embalse del Guadalhorce, se estimó del orden de 50.000 toneladas/año de cloruro sódico y 4.600 toneladas/año de sulfato cálcico (CARRASCO & BENAVENTE 1986). Ello equivale a la cantidad

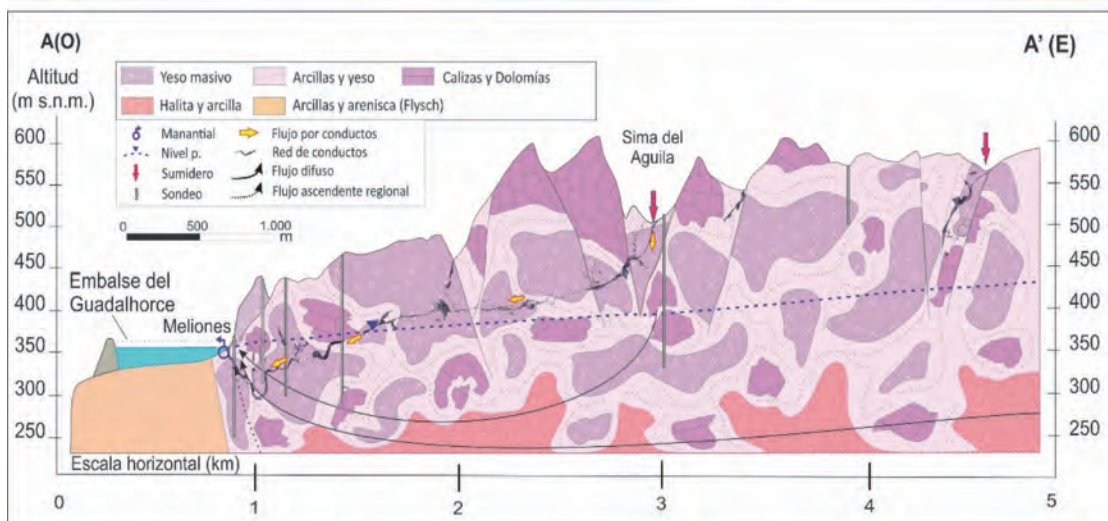


Figura 6. Propuesta del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del Trías de Antequera para el sector de Meliones (ANDREO *et al.* 2016).

de 138 y 12,6 t/día respectivamente o a una aportación de 1,6 kg por segundo de sal gema y 100 g/s de yeso.

Como ya se ha indicado, a partir de finales del año 1976, el sector de Meliones quedó inundado por el embalse del Guadalhorce (Fig. 7) y desde entonces las surgencias de agua salada sólo quedan al descubierto cuando desciende el nivel del mismo en periodos de sequía. Las últimas veces que esto ocurrió fueron durante el periodo de mayo de 2004 a febrero de 2009 y desde septiembre de 2017 hasta marzo de 2018.

Al quedar el manantial inundado, mediante registros verticales de la salinidad del agua embalsada, introduciendo un salinómetro a diferentes profundidades, se pudo constatar que había un flujo de agua salada (más densa) que discurría por el fondo del embalse hacia aguas abajo, ocupando las zonas más deprimidas del vaso, zonas que generalmente coincidían con el cauce primitivo del río. También existían procesos de mezcla y dilución con el agua embalsada.

Durante los periodos en los que el manantial queda inundado se ha comprobado que se originan nuevas surgencias de agua salada a cota más alta, debido a que la contrapresión del embalse y a los sedimentos acumulados hace ascender el nivel del agua salada en el terreno.

En el último periodo en el que el manantial ha quedado al descubierto, la principal surgencia salina ha presentado un caudal del orden de 12 l/s con una salinidad de unos 120 g/l, unas cuatro veces la salinidad del agua del mar, lo que representa una aportación de sales de 124 toneladas al día. Durante los últimos episodios lluviosos de los meses de octubre y diciembre de 2017 se produjeron aumentos del caudal del manantial y un pequeño descenso de la salinidad. Las importantes lluvias de marzo de 2018 ocasionaron el aumento del nivel del agua del embalse y la inundación del sector de Meliones.

Desde el año 1981, el equipo de explotación de las Presas del Guadalhorce de la Confederación Hidrográfica del Sur, en la actualidad perteneciente a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, lleva un control de la salinidad del embalse. Periódicamente, y mediante un proceso sistematizado, se realiza en diferentes puntos una toma de muestras de agua a distintas profundidades y se determina su salinidad.

A partir de ahí se calcula la cantidad de sal contenida en el embalse y se obtiene, entre otras variables, la cantidad de sales aportadas al mismo en un determinado periodo de tiempo. Para el periodo de 1981-2010 la aportación de sal ha sido de 435 toneladas al día (JUNTA DE ANDALUCÍA 2010).



Figura 7. El manantial de Meliones inundado por el embalse del Guadalhorce.

Se ha comprobado que las aguas de mayor salinidad tienden a concentrarse en el fondo del embalse. Así, en condiciones normales, se produce una estratificación con aguas más salobres en el fondo y menos salobres hacia la superficie. En verano, la estratificación es máxima, con una diferenciación mayor entre las salinidades de fondo y superficie, mientras que en invierno la diferencia es menor. A la altura de la torre de toma de agua podemos considerar que la salinidad está comprendida entre 1,5 y 4 g/l, (Fig. 8) aunque durante las sequías se llegan a alcanzar valores de salinidad de hasta 15 g/l en el fondo del embalse.

Con objeto de disminuir la cantidad de sal acumulada, en diferentes ocasiones, se han realizado desembalses de aguas salobres acumuladas en el fondo coincidiendo con periodos de altas lluvias en los que no se regaba, por lo que las aguas salobres iban directamente al mar.

ACTUACIONES PARA DISMINUIR LA APORTACIÓN SALINA AL EMBALSE

La antigua Confederación Hidrográfica del Sur realizó varias actuaciones con objeto captar las salmueras y evitar la salinización del agua almacenada en el embalse del Guadalhorce. La primera de ellas (1985-87) consistió en elevar las aguas del manantial de Meliones al recinto de Cañaveralejo, donde se habían construido unas balsas de evaporación para la obtención de sal. La infiltración del agua salada en el vaso de evaporación puso fin a esta actuación ya que, en definitiva, una parte del agua volvería al embalse. También en algún momento (1984) se pensó en elevar el agua salada a la laguna de Fuente de Piedra.

Años más tarde, en 1993, el Servicio Geológico de Obras Públicas efectuó una prueba experimental de captación de las salmueras surgentes al embalse. Se perforaron sondeos en la ladera izquierda del río a cotas superiores a la del manantial. Se bombeó durante un mes un caudal próximo a 30 l/s y se extrajeron 65.000 m³ de salmuera con un total de 16.500 toneladas de sal. Durante los bombeos disminuyeron los aportes naturales de aguas saladas al embalse, lo que llevó a pensar que el procedimiento permitiría eliminar el flujo salino.

Una actuación de mayor envergadura realizada por la Confederación Hidrográfica

del Sur consistió en construir un pozo para captación de las salmueras, que se elevaban mediante un bombeo hasta la divisoria hidrográfica de la cuenca del Guadalhorce situada unos 300 m por encima del cauce del río. Posteriormente una conducción por gravedad, de 51 km, conducía el agua salada hasta el mar en las proximidades de Málaga.

TORRE DE TOMA

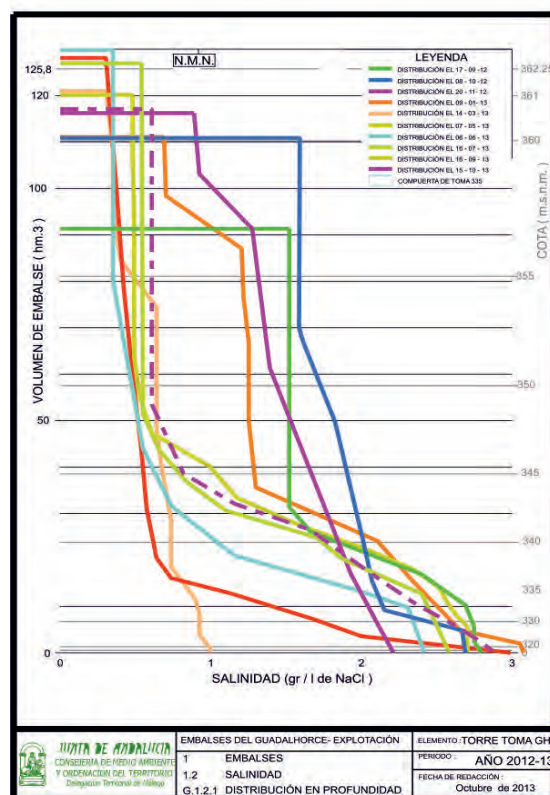


Figura 8. Distribución vertical de la salinidad en el embalse del Guadalhorce (JUNTA DE ANDALUCÍA 2013).

Estas instalaciones, que tenían una capacidad para 75 l/s, empezaron a funcionar en 1993, dentro de un acusado período de sequía. Dos problemas vinieron a truncar esta estrategia y originaron el abandono de la captación y del saleoducto. En primer lugar, el colapso y hundimiento del entorno inmediato de la captación y, en segundo lugar, la rotura de la conducción que transportaba la salmuera al mar, por los deslizamientos producidos en varios puntos del trazado, con el vertido de aguas hipersalinas por los puntos de rotura. Por otro lado, en diciembre de 1995 comenzó una época muy lluviosa que originó una gran aportación de sales al embalse que se interpretó

relacionada con desarrollo de cavidades originadas por los bombeos, no se tuvo en cuenta la posible existencia de un efecto pistón de las salmueras acumuladas en el Trías.

Durante el periodo en el que estuvo en funcionamiento el saleoducto se transportaron hasta el mar más de 300.000 toneladas de cloruro sódico y se redujeron las aportaciones salinas (JUNTA DE ANDALUCÍA 2010).

En el año 1994, la Confederación Hidrográfica del Sur emprendió una campaña de corrección de la infiltración de aguas superficiales en la supuesta área de recarga del manantial de Meliones mediante la construcción de pequeñas presas para evitar la entrada de las aguas de escorrentía a los sumideros kársticos (JUNTA DE ANDALUCÍA 2010, Fig. 9). Esta iniciativa no tuvo éxito por dos motivos. En primer lugar, el intento de evitar la recarga se centró en las dolinas y simas situadas en los cauces de los arroyos, sin tener en cuenta la existencia de muchas más dolinas en la superficie del karst y, además, que una parte importante de la infiltración se produce directamente sobre el conjunto de la superficie en la que afloran los materiales del Trías.

Por otro lado, no se consideró que la dinámica del karst yesífero y salino es muy rápida ante cualquier modificación de las condiciones naturales. Así, cuando se desviaron algunos cursos de agua superficial para que no se infiltraran en las simas existentes, se formaron nuevos sumideros aguas abajo, de tal manera que las aguas volvían a infiltrarse en el terreno. También se presentaron algunos problemas medioambientales en relación con la existencia de colonias de murciélagos en las cavidades.



Figura 9. Presa para evitar la entrada de escorrentía en un sumidero kárstico.

PROPUESTAS PARA DISMINUIR LA SALINIDAD DEL EMBALSE DEL GUADALHORCE

Es utópico concebir como solución única y definitiva las actuaciones encaminadas a evitar la infiltración del agua de lluvia y escorrentía mediante tratamientos en dolinas y sumideros kársticos. Se ha comprobado, que las actuaciones realizadas hasta la fecha, han sido ineficaces.

En función de los trabajos realizados por los diferentes organismos que han abordado el problema de la aportación salina al embalse del Guadalhorce existen tres tipos de alternativas que se exponen en orden cronológico:

En primer lugar, se presenta la solución propuesta por el SGOP (1993), que consiste en el bombeo de agua salada en una batería de sondeos situados en el entorno de las surgencias salinas. Las aguas bombeadas se llevarían mediante una conducción al mar, o podrían ser aprovechadas mediante su evaporación en balsas para obtención de sales. De esta forma se evitaría, al menos parcialmente, la llegada de las salmueras al embalse.

Esta alternativa se podría poner en marcha rápidamente, el coste de inversión no es demasiado elevado y en el caso de obtención de sal se tendría un aporte económico. No obstante, hay que indicar que esta solución no es definitiva, dado que los aumentos de caudal de las surgencias salinas durante los periodos de lluvia no podrían ser bombeados en los sondeos, por lo que llegarían al embalse importantes aportaciones de sales en determinados periodos.

La segunda alternativa, planteada por la Confederación Hidrográfica del Sur (1999) y por ACUSUR (2002) referida en Junta de Andalucía (2010), propone aislar el estrecho de Meliones con dos presas, de 20 y 30 m de altura, situadas aguas arriba y aguas abajo del manantial. El espacio comprendido entre ambas presas se aprovecharía para almacenar el agua salada, que se bombearía posteriormente, y mediante un saleoducto se evacuaría finalmente al mar. Sería necesario efectuar un desvío del río, posiblemente en túnel o en canal por una de las dos laderas, preferentemente por la margen derecha.

Esta solución, considerando que las obras fueran bien diseñadas y se realizaran

adecuadamente eliminaría los aportes salinos al embalse y la calidad del agua alcanzaría niveles adecuados para su uso, bien agrícola o de abastecimiento. No obstante, presenta un coste bastante alto y existen ciertas incertidumbres en relación al comportamiento del manantial, del túnel o del canal y de las presas con los caudales muy altos de las avenidas extraordinarias del río, en un entorno muy dinámico y geotécnicamente bastante complicado.

En tercer lugar, se plantea dejar el manantial en su estado actual, es decir en condiciones naturales. En este caso las aguas saladas se mezclarían con las del embalse, se almacenarían en el fondo del mismo con una salinidad media de 4-8 g/l y se transportarían mediante una conducción nueva a la planta desalobradoradora de El Atabal, situada en las cercanías de Málaga, donde mediante el correspondiente tratamiento se podrían utilizar para el abastecimiento urbano.

Esta alternativa, presentada por ACUAMED (TROYANO & DÍAZ 2006) y una de las recomendaciones efectuadas por el Instituto Geológico y Minero de España (2005) se podría poner en marcha con relativa rapidez, la desalobradoradora ya está construida, no hay riesgo alguno y no se altera el karst yesífero de Gobantes. El coste de inversión es menor, pues solo sería necesario realizar la conducción, aunque obliga al tratamiento de grandes volúmenes de agua y presenta un alto coste de mantenimiento y energético. Por otra parte, tampoco es una solución definitiva debido a que los recursos utilizables desde la presa del Guadalhorce para el abastecimiento a Málaga son menores que las aportaciones medias del río por lo que las sales se irían acumulando en el embalse.

EPÍLOGO

Llegados a este extremo, nos podríamos preguntar: ¿Cuál es la solución más adecuada para resolver el problema de la salinidad del embalse del Guadalhorce? Aunque no es el momento, ni soy la persona que debe tomar esta decisión, y la solución al problema no es fácil, me atrevo a sugerir que según los conocimientos geológicos e hidrogeológicos actuales del manantial de Meliones y su entorno, y analizadas las experiencias previas, la segunda propuesta (construcción

de dos presas y desviación del río), debería ser aparcada hasta que se resuelvan las incertidumbres que existen y los riesgos que conlleva, además de necesitar una mayor inversión.

Considero que la alternativa tercera, conducir el agua salobre del fondo del embalse a la desalobradoradora del Atabal, aunque no es la solución definitiva, es la más viable en la actualidad. Se puede poner en marcha en un plazo relativamente corto, en el que sería necesario realizar una conducción nueva desde la presa del Guadalhorce a la desalobradoradora de Málaga. Además, presenta la ventaja de que se separarían las aguas de abastecimiento a la ciudad de las que se utilizan para los regadíos que actualmente se conducen por el mismo canal, aunque previamente sería necesario conocer los costes de desalación.

Por otra parte, es fundamental disminuir los vertidos salinos al embalse. Esto se puede realizar mediante unos pozos similares a los construidos por la Confederación Hidrográfica del Sur o mediante sondeos del mismo tipo que los realizados por el Servicio Geológico del MOPU. En ellos se podría bombear agua salada que se llevaría mediante una conducción de salmueras hasta la presa del Guadalhorce donde se incorporaría a la plataforma que habría que realizar para la nueva tubería del abastecimiento. Parte del agua bombeada podría elevarse a balsas de evaporación para la obtención de sales, aunque hay que tener en cuenta que la topografía de la región, con la excepción del sector de la vega de Bobadilla, no es propicia para la habilitación de terrenos llanos de dimensiones adecuadas.

Independientemente de la solución que se adopte, considero que es imprescindible poner en marcha un riguroso programa de investigación. Es necesario profundizar en el conocimiento de la hidrogeología del Trías de Antequera para confirmar el modelo que aquí se ha propuesto, acerca del proceso de infiltración del agua y de los diferentes tipos de flujos subterráneos hacia los puntos de descarga.

Se debería caracterizar el funcionamiento del manantial de Meliones a partir del análisis de sus respuestas naturales (hidrodinámicas, hidroquímicas, hidro-térmicas, e isotópicas) en los periodos en los que no está inundado.

Los ensayos con trazadores artificiales (fluoresceína, piranina, etc.) servirían para

evidenciar la conexión hidráulica entre los puntos de inyección y los de aparición del trazador; es decir, para corroborar direcciones de flujo y su velocidad, así como para delimitar con precisión las cuencas vertientes a los diferentes manantiales.

A partir de los modelos digitales de elevación de alta resolución que ya existen, junto con trabajos de campo, se podría realizar un tratamiento cuantitativo preciso del relieve que permitiría identificar depresiones y colapsos y la delimitación de sus cuencas vertientes.

El análisis de imágenes radar de satélites obtenidas por la Agencia Espacial Europea se podría utilizar para detectar los desplazamientos de la superficie del terreno a lo largo del tiempo, lo que permitiría delimitar las zonas afectadas por subsidencias debidas a la disolución de evaporitas y las zonas elevadas por el diapirismo.

Todas estas cuestiones son fundamentales para conocer el funcionamiento hidrogeológico de los materiales kársticos evaporíticos y para la solución que se adopte en relación a la captación del manantial de Meliones y a la eliminación de su descarga salina en el embalse del Guadalhorce.

AGRADECIMIENTOS

Quiero citar *In memoriam* a Rafael Conejo y a Agustín Escolano, que dedicaron gran parte de su tiempo a estudiar las surgencias salinas de Meliones.

Igualmente quiero agradecer los trabajos de mis compañeros Rafael Mayorga y Luis Morales y a todas las personas que han contribuido al conocimiento de este tema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREO B., GIL-MARQUEZ J.M., MUDARRA M., LINARES L. & CARRASCO F. 2016. Hypothesis on the hydrogeological context of wetlands areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaen provinces, Southern Spain). *Environmental Earth Sciences* 75 (9): 1-19.
- CALAFORRA J.M. 1998. *Karstología de yesos*. Monografías Ciencia y Tecnología 3. Universidad de Almería - Instituto de Estudios Almerienses, 384 pp.

- CARRASCO F. 1978. Variación de la salinidad de las aguas del río Guadalhorce. Influencia de las litofacies. *Tecniterrae* 22: 35-41.
- CARRASCO F. 1979. Captación de manantiales salinos subacuáticos en el fondo de embalses. Manantial Meliones. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos* 4: 465-479.
- CARRASCO F. 1986. *Contribución al conocimiento de la cuenca alta del río Guadalhorce. El medio físico*. *Hidrogeoquímica*. Tesis Doctoral Universidad de Granada, 435 pp.
- CARRASCO F. & BENAVENTE J. 1986. *Estimación de la aportación salina al río Guadalhorce en el sector de Bobadilla-Gobantes (Provincia de Málaga)*. II Simposio sobre Agua en Andalucía, Granada, 273-277.
- CARRASCO F., DURÁN J.J. & CALAFORRA J.M. 2007. El Trías de Antequera. En B. Andreo (coord.) *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*, Tomo 2: 205-210.
- CATALÁN J., SANCHEZ DE LA TORRE & AGUEDA J. 1967. *Estudio de litofacies en la cuenca receptora de los ríos Guadalteba, Guadalhorce y Turón*. Instituto de Geología Económica del C.S.I.C. Informe inédito.
- CEDEX 1998. *Estudio de soluciones sobre las aportaciones salinas al embalse del Guadalhorce, provocadas por las surgencias de Meliones y otras fuentes*. 67 pp., 4 planos y 6 anexos.
- COMISARÍA DE AGUAS DEL SUR DE ESPAÑA. 1974-1980. *Memorias de la Sección de Lucha contra la Contaminación*. Informes inéditos.
- DURÁN J.J. & MOLINA J.A. 1986. Karst en yesos del Trías de Antequera (Cordilleras Béticas). *Karstologie Memoires* 1: 37-46.
- ESCOLANO A. 1974. La calidad de las aguas de los ríos Turón, Guadalteba y Guadalhorce en relación con sus aprovechamientos actual y futuro. V Coloquio de investigaciones sobre el agua. *Doc. Inv. Hidrol.* 17: 97-121.
- ESCOLANO A. & CONEJO R. 1981. *Eliminación y explotación del manantial salino de Meliones (Málaga) para evitar la salinización del río Guadalhorce*. I Simposio Agua en Andalucía, vol I: 469-486.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA 2005. *Nota técnica sobre el manantial salino de Meliones (Málaga) y las posibles actuaciones sobre el mismo*. Informe inédito, 8 pp.

- JUNTA DE ANDALUCÍA, AGENCIA ANDALUZA DEL AGUA 2010. *Salinidad del embalse del Guadalhorce*. Informe interno.
- JUNTA DE ANDALUCÍA 2013. *Embalses del Guadalhorce. Distribución vertical de la salinidad*. Informe interno.
- JUNTA DE ANDALUCÍA & GHUMA 2005. *Contexto hidrogeológico de humedales andaluces*, 7 tomos.
- MOLINA J.A. 1982. Los karst en yesos en la provincia de Málaga. Revista 75 Aniversario Sociedad Excursionista de Málaga: 95-112.
- PÉREZ-LÓPEZ A. 1991. *El Trías de facies germánica del sector Central de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral Universidad de Granada. 400 pp.
- PEYRE Y. 1974. *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères Bétiques, Espagne)*. These Univ. Paris, 528 pp.
- PLIEGO J.M. 1976. *Informe sobre la salinidad del río Guadalhorce*. Centro de Estudios Hidrográficos. Informe inédito.
- SANZ DE GALDEANO C., LOZANO J.A. & PUGA E. 2008. El Trías de Antequera: naturaleza, origen y estructura. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 21(3-4): 111-124.
- SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS PÚBLICAS 1980. *Captación del manantial salino subacuático de Meliones. Embalse del Guadalhorce-Guadalteba*. Informe inédito.
- SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS PÚBLICAS 1991. *Estudio y captación de los manantiales salinos del embalse del Guadalhorce*. Informe inédito.
- SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS PÚBLICAS 1993. *Prueba experimental de captación de las salmueras surgentes al embalse del Guadalhorce*. Informe inédito.
- TOTH J. 1970. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *J. Hydrol.* 10: 164-176.
- TROYANO F. & DÍAZ J.C. 2006. *Recuperación de las aguas salobres del río Guadalhorce por desalación*. III congreso de Ingeniería Civil. Territorio y Medio Ambiente.