

# Análisis de la interacción entre el acuífero aluvial del río Guadiaro y los sistemas hidrológicos de su desembocadura

*Analysis of the interaction between the Guadiaro-River alluvial aquifer and the hydrological systems at its mouth*

Alejandro Millán Madrid<sup>1\*</sup>, José Manuel Gil Márquez<sup>1</sup> y Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Hidrogeología y Departamento de Geología de la Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias. 29071, Málaga  
[ale.mm@uma.es](mailto:ale.mm@uma.es); [jmgil@uma.es](mailto:jmgil@uma.es); [andreo@uma.es](mailto:andreo@uma.es)

\*Corresponding author

## ABSTRACT

The alluvial aquifer of the Guadiaro, Genal and Hozgarganta rivers, located in the western part of the Mediterranean coast, is made up of recent alluvial deposits and old fluvial terraces that occupy the meadows of these rivers. Near the Guadiaro river mouth, the Torreguadiaro lagoon exists and an estuary of great ecological value is formed where the fluvial-tidal dynamics play a key role. To clarify the hydrological and hydrogeological interactions, occurring between the different systems, temperature and water level sensors have been installed at several points to record continuous measurements of such variables. The results of the time series analysis, based on spectral and cross-correlation analyses, corroborate the clear tidal influence on the hydrodynamics of the the Guadiaro river stuary and the alluvial aquifer, and also show an interaction between the latter and the Torreguadiaro lagoon.

**Key-words:** alluvial aquifer, Guadiaro River, Torreguadiaro lagoon, tidal influence.

Geogaceta, 74 (2023), 67-70  
<https://doi.org/10.55407/geogaceta98447>  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

## RESUMEN

El acuífero aluvial de los ríos Guadiaro, Genal y Hozgarganta, situado en la zona occidental del litoral mediterráneo andaluz, está constituido por los depósitos aluviales recientes y las terrazas fluviales que ocupan las vegas de dichos ríos. En el sector de la desembocadura se encuentra la laguna de Torreguadiaro y existe un estuario donde la dinámica fluvio-mareal juega un papel clave. Para esclarecer las interacciones hidrológicas e hidrogeológicas que se dan entre los distintos sistemas, se han instalado sensores de registro continuo de la temperatura y del nivel de lámina de agua en varios puntos. Los resultados de los análisis correlatorio cruzado y espectral aplicado a las series temporales corroboran la influencia mareal sobre el estuario del río Guadiaro y el acuífero aluvial, y ponen de manifiesto la interacción entre este último y la laguna de Torreguadiaro.

**Palabras clave:** acuífero aluvial, río Guadiaro, laguna de Torreguadiaro, influencia mareal.

Fecha de recepción: 13/02/2023

Fecha de revisión: 20/04/2023

Fecha de aceptación: 26/05/2023

## Introducción

El acuífero aluvial de los ríos Guadiaro, Genal y Hozgarganta se sitúa en el sector occidental del litoral mediterráneo andaluz, entre las provincias de Cádiz y Málaga (Fig. 1). Tradicionalmente, en los valles de dichos ríos se ha concentrado una importante actividad agrícola, que ha crecido en las últimas décadas (Castillo Rodríguez, 2011). Además, en los últimos años se ha producido una transición desde cultivos de cítricos hacia frutales subtropicales. Todo ello acarrea un considerable aumento en el consumo de agua destinado al regadío.

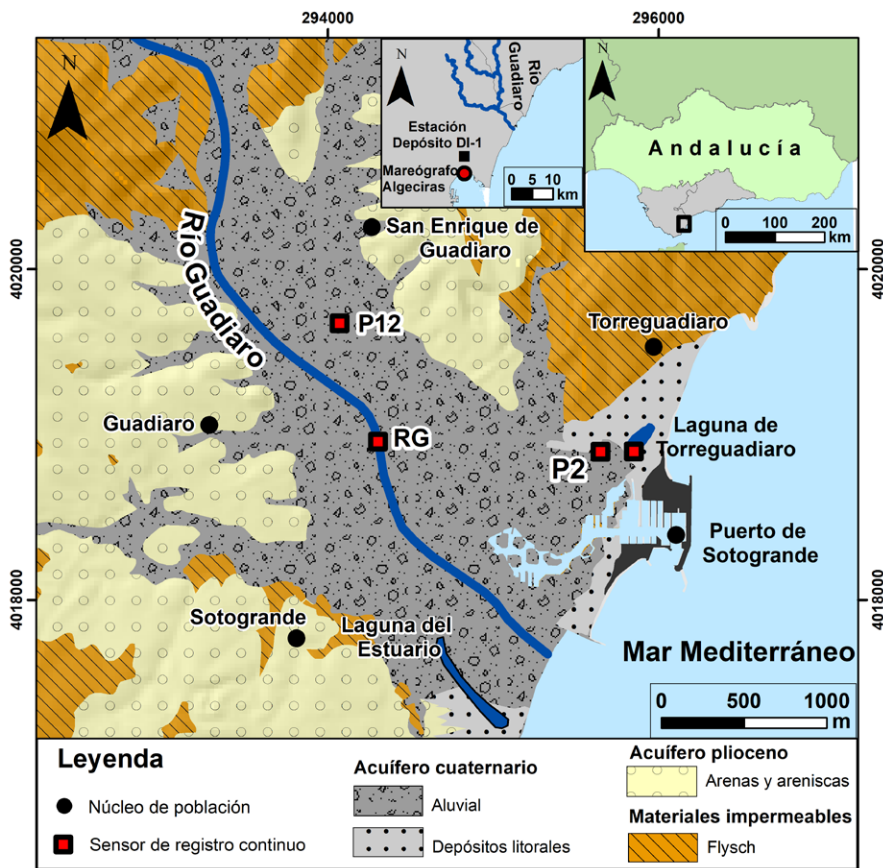
El acuífero aluvial de los ríos Guadiaro, Genal y Hozgarganta está constituido por los depósitos aluviales recientes y por antiguas terrazas fluviales, de edad Cuaternario, que ocupan las vegas de dichos ríos (IGME, 1982). El acuífero, de 60 km<sup>2</sup> de extensión, está formado por arenas,

gravas, limos y arcillas y sus límites están marcados principalmente por el contacto con los materiales impermeables del Flysch del Campo de Gibraltar (Fig. 1). Al sureste, limita con el mar Mediterráneo y al suroeste con el acuífero plioceno de Sotogrande, formado por arenas y areniscas. Este último podría descargar parte de sus recursos hacia el acuífero cuaternario (IGME, 1982 y Gollonet y Rodríguez, 2005).

La anchura de los depósitos aluviales es muy variable, aunque no suele superar los 600 m (Morales-García, 2007). El espesor del acuífero cuaternario aumenta hacia la desembocadura del río Guadiaro, donde alcanza más de 50 m. Se trata de un acuífero muy permeable y transmisivo, con el nivel piezométrico próximo a la superficie, lo que lo hace muy vulnerable a la contaminación, dada la escasa zona no saturada que presenta y las actividades antrópicas que sobre él se desarrollan.

La desembocadura del río Guadiaro da lugar a la formación de un estuario de gran interés ecológico. En sus inmediaciones se encuentran las lagunas de Torreguadiaro y del Estuario (Fig. 1), claves en los flujos migratorios de aves (Muñoz-Pérez *et al.*, 2000). En las últimas décadas, este entorno ha sido objeto de severas transformaciones, debido a la creación del puerto deportivo de Sotogrande (Fig. 1) y al crecimiento urbanístico ligado al turismo. Todo ello ha supuesto un cambio en el régimen sedimentario del estuario, donde la dinámica fluvio-mareal juega un papel clave sobre los sistemas hidrológicos de la zona.

El objetivo de este trabajo es identificar y valorar la intensidad de las interacciones hidrogeológicas existentes entre los distintos sistemas hidrológicos de la desembocadura del río Guadiaro (Fig. 1) a partir del tratamiento estadístico de series temporales de nivel de agua y tem-



**Fig. 1.- Localización geográfica del área de estudio. Se muestran los acuíferos existentes en este sector, así como la ubicación de los sensores de registro continuo. Ver figura en color en versión web.**

*Fig. 1.- Geographical location of the study area, showing the different aquifers that exist in this sector and their boundaries, as well as the location of the data loggers. See color figure on web.*

peratura en diferentes puntos de agua subterránea y superficial (mar Mediterráneo, río Guadiaro y humedal).

## Metodología

Se han instalado sensores de medida y registro continuo (*Odyssey® Depth/Temperature Logger*) en dos puntos del acuífero aluvial (P2 y P12), en el cauce del río Guadiaro (sector de la desembocadura; RG) y en la laguna de Torreguadiaro (Fig. 1) para controlar, con periodicidad horaria, las variaciones de lámina de agua y temperatura. Con objeto de contrastar los datos obtenidos por los equipos se han realizado medidas puntuales de nivel piezométrico en P2 y P12 y de altura de lámina de agua en el río y en el humedal.

Los puntos P2 y P12 son dos pozos de gran diámetro situados en el acuífero aluvial del río Guadiaro, a una distancia de la línea de costa de 400 m y 2100 m, respectivamente. Estos pozos no se usan actualmente por lo que las variaciones de su nivel piezométrico no están condicionadas por extracción de agua mediante

bombear. Además, son representativos de zonas del acuífero situadas a distinta distancia de la línea de costa. Las series temporales tienen una duración comprendida entre el 11 de agosto de 2022 y el 20 de octubre de 2022, fecha en la que se realizó la última descarga conjunta de datos.

Con el fin de comparar los registros obtenidos en los puntos de control frente a la oscilación mareal se han utilizado los datos registrados en el mareógrafo de Algeciras, localizado en el puerto homónimo (Fig. 1). Estos datos están disponibles en la web de Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)). Para identificar posibles efectos de la evaporación sobre la lámina de agua del humedal y ante la falta de disponibilidad de datos horarios de este parámetro, se han utilizado los datos de temperatura del aire de la estación número 7 (Depósito DI-1) del SAIH HIDROSUR, situada 15 km al SO de la desembocadura del río Guadiaro (Fig. 1). En investigaciones previas (Nieto, 2020) bajo condiciones similares se ha aplicado la misma metodología ya que la temperatura es uno de los principales factores de los que depende la evaporación.

A todas las series temporales se les ha realizado un análisis espectral simple, que permite identificar frecuencias correspondientes a periodicidades promedio. Con el fin de establecer posibles relaciones entre una serie de datos de entrada (causa) y otra de salida (efecto) se han realizado varios análisis correlatorios cruzados entre los distintos registros disponibles. La ventana de observación que se ha utilizado para estos análisis es de 300 horas. Tanto los análisis espectrales simples, como los correlatorios cruzados han sido elaborados con el *software* de acceso libre Trasero 2.1 (Padilla y Delgado, 2013).

## Resultados

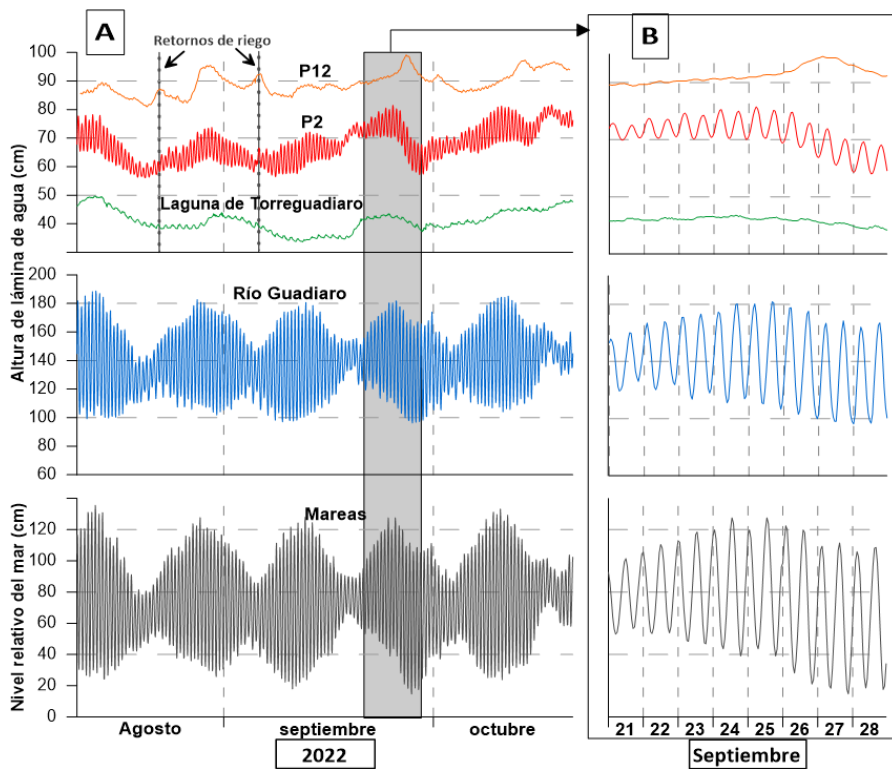
En la figura 2 se muestra la altura de lámina de agua registrada por los sensores, así como la evolución del nivel del mar. Se puede observar el registro completo disponible (Fig. 2A), y el periodo que corresponde a una semana (entre los días 21 y 28 de septiembre; Fig. 2B) en el que se aprecian las evoluciones de forma más detallada. Se ha seleccionado este periodo debido a que se produce un ascenso generalizado de los niveles.

Los mayores rangos de amplitud de lámina de agua se registran en el nivel del mar y del río Guadiaro, con variaciones de 121 y 92,5 cm, respectivamente. Por el contrario, la altura de la lámina de agua en la laguna de Torreguadiaro es la que presenta una amplitud menor, con una variación de 16 cm, mientras que los puntos P2 y P12 muestran variaciones de 25,5 y 18,2 cm, respectivamente.

Se puede apreciar que la periodicidad mareal semidiurna, que presenta máximos y mínimos característicos cada 12 horas, se refleja claramente en el nivel del acuífero cuaternario (P2) y del río Guadiaro (Fig. 2A y 2B), lo que sugiere una notable influencia del mar sobre estos puntos.

La evolución de la lámina de agua de la laguna de Torreguadiaro presenta cierta correspondencia con el nivel del mar y del acuífero cuaternario en P2. No obstante, parece guardar más relación con los ciclos mareales mensuales (Fig. 2A), dado que las variaciones intradiarias que se registran en el nivel de la laguna son de menor magnitud (Fig. 2B). Los cambios piezométricos interdiarios observados en el pozo P2 tardan en verse reflejados en la lámina de agua del humedal.

En el registro del pozo P12 también se puede apreciar una evolución con algu-



**Fig. 2.- Evolución de la altura de lámina de agua de los distintos sistemas hidrológicos e hidrogeológicos que conforman el área del bajo Guadiaro. Período A) completo. B) comprendido entre el 21 y 28 de septiembre. Ver figura en color en versión web.**

*Fig. 2.-Evolution of the water stage/table at different hydrological and hydrogeological systems in the lower Guadiaro area. Period A) Complete. B) from September 21 to 28. See color figure on web.*

nas similitudes a las series temporales de P2 y del río Guadiaro (Fig. 2A), por lo que existe cierta influencia mareal desfasada, aunque la señal intradiaria que se observa es muy tenue (Fig. 2B). No obstante, este pozo podría estar influenciado por retornos de riego ya que durante los trabajos de campo se han observado riegos por inundación en los cultivos adyacentes y presenta ascensos marcados del nivel de agua que no se observan en el resto de puntos de control (Fig. 2A), ni se relacionan con eventos de precipitación.

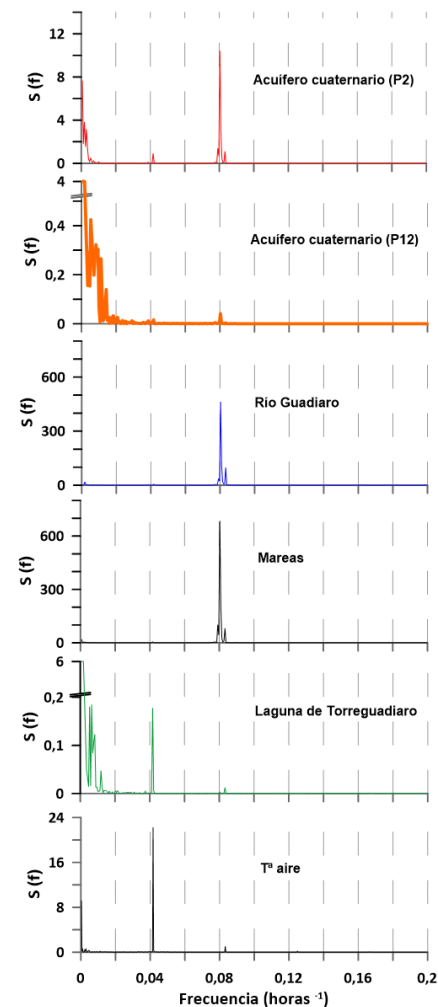
Los análisis espectrales realizados a las distintas series de datos (Fig. 3) ponen de manifiesto que los registros del río Guadiaro y del acuífero cuaternario en P2 presentan señales periódicas muy acentuadas a las 12 horas, características de las mareas semidiurnas, lo que corrobora la influencia del mar Mediterráneo sobre estos puntos. En la laguna de Torreguadiaro se detecta un pico de frecuencia a las 24 horas que coincide con la señal de la temperatura del aire (Fig.3) y, por tanto, podría guardar relación con la evaporación. La señal de las mareas (12 horas) apenas se refleja en la lámina de agua del humedal pese a su cercanía a la línea de costa. En estudios previos realizados en humedales costeros (Fernández-Ayuso

*et al.*, 2019) tampoco se pudo constatar el efecto de las mareas sobre las lagunas cercanas mediante este tipo de análisis. Sin embargo, Nieto (2020) sí detectó la influencia mareal en humedales situados en acuíferos costeros.

Los resultados del análisis espectral del nivel piezométrico del acuífero cuaternario (P12) muestran una tenue señal a las 12 horas (Fig. 3), que está ligada una vez más a la periodicidad de las mareas semidiurnas (Fig. 2B).

Los resultados de los análisis correlatorios cruzados (Fig. 4) entre las mareas (señal de entrada) y el nivel del agua en el río Guadiaro y el acuífero aluvial (en P2) corroboran la influencia de las mareas sobre estos sistemas, con valores máximos del coeficiente de correlación ( $r_{xy}$ ) de 0,97 y 0,66 y un retardo de 2 y 4 horas, respectivamente. También se observa una correlación significativa ( $r_{xy}=0,68$ ) entre el río Guadiaro y el punto P2, con un retraso de 1 hora. Esto se podría deber a que las mareas penetran directamente por el estuario del río Guadiaro y posteriormente se propagan hacia el acuífero.

El correlograma cruzado realizado entre el nivel piezométrico en el acuífero aluvial en P2, como señal de entrada, y el nivel de agua de la laguna de Torreguadiaro,

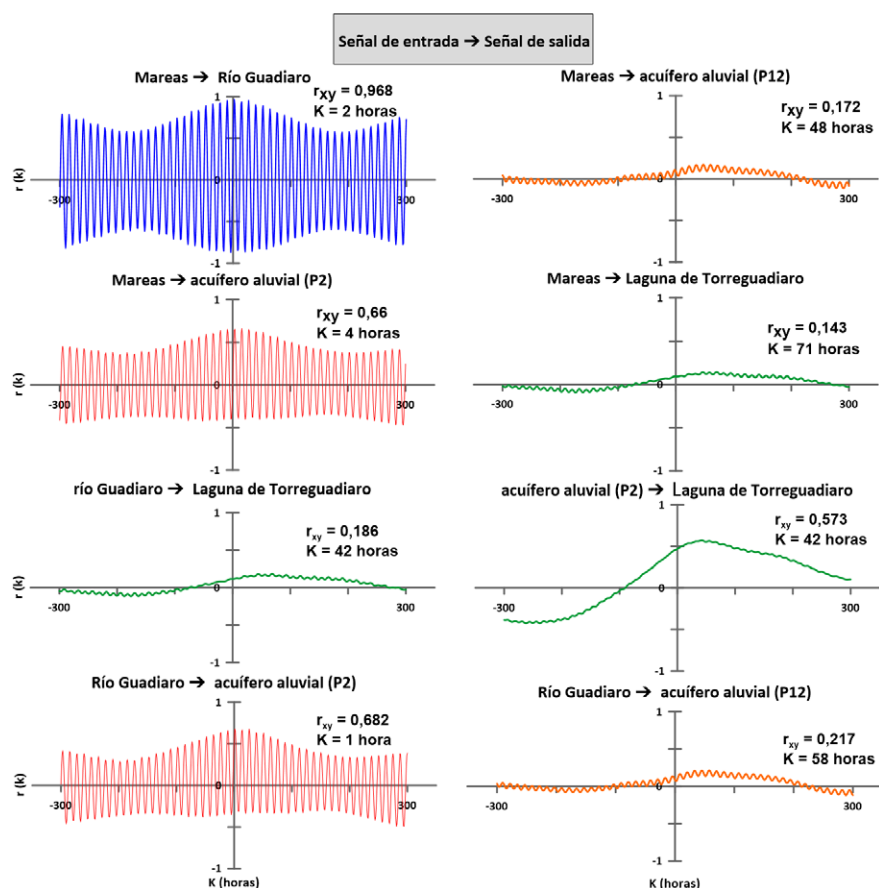


**Fig. 3.- Resultados de los análisis espectrales realizados a las series temporales de datos de nivel piezométrico del acuífero cuaternario (P2 y P12), río Guadiaro, laguna de Torreguadiaro, mareas y temperatura del aire. El eje X muestra la frecuencia de la señal periódica en horas<sup>-1</sup> y el eje Y representa la densidad espectral-S(f).**

*Fig. 3.- Results of the spectral analysis of the time series of the quaternary aquifer (P2 and P12), Guadiaro river, Torreguadiaro wetland, tides and air temperature. The X-axis shows the frequency of the periodic signal in hours<sup>-1</sup> and the Y-axis represents the spectral density-S(f).*

como señal de salida, muestra un coeficiente de correlación ( $r_{xy}$ ) de 0,57, aunque con un retardo de 42 horas. Ello podría indicar que el humedal estaría recibiendo aportes subterráneos del acuífero cuaternario. Esta correlación no se detecta si se utiliza la serie temporal de mareas o de altura del nivel del agua en el río Guadiaro como señal de entrada. El retardo en la respuesta podría tener su origen en una menor transmisividad del medio en el entorno de la laguna, posiblemente como consecuencia de la acumulación de sedimentos finos en su cubeta. De ahí que la señal intradiaria de las mareas se atenúe antes de llegar al humedal y no se vea reflejado en este el pico de frecuencia espectral asociado a 12 h.





**Fig. 4.- Resultados de los análisis de correlatorio cruzado entre las series temporales de mareas, temperatura del aire y altura de lámina de agua en el acuífero (P2 y P12), río Guadiaro y laguna de Torreguadiaro. En la zona superior derecha de cada gráfico se muestran los correspondientes valores máximos de  $r_{xy}$  (coeficiente de correlación) y de  $k$  (paso de tiempo en horas).**

*Fig. 4.- Results of the cross-correlation analysis between the time series of tides, air temperature and water table in the aquifer (P2 and P12), and water stage in the Guadiaro river and the Torreguadiaro lagoon. In the upper right area of each graph is shown the corresponding maximum values of  $r_{xy}$  (correlation coefficient) and the  $k$  (time step in hours).*

El punto P12 del acuífero aluvial no muestra correlación con el resto de series de datos (Fig. 4), lo que podría deberse a su mayor distancia a la línea de costa y a la posible afección de los retornos de riego.

## Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de los análisis realizados a las series temporales de datos de altura de lámina de agua de los distintos sistemas que conforman el sector de desembocadura del río Guadiaro, se corrobora la destacada influencia que ejerce sobre ellos el mar Mediterráneo.

El acuífero cuaternario en el pozo P2 y el estuario del río Guadiaro muestran respuestas significativas de nivel de lámina de agua a las variaciones mareales de tipo semidiurno (Fig 2B) e interdiario (Fig. 2A). Esto se ha corroborado mediante los resultados de los análisis espectrales y correlatorios cruzados. El río Guadiaro y el punto P2 también presentan una buena correlación entre sí, lo que sugiere que la onda mareal se podría transmitir desde el estuario hacia

el acuífero, aunque dada la escasa distancia que separa a P2 de la línea de costa, posiblemente también reciba influencia mareal directamente desde el mar. En el punto P12 se ha detectado cierta influencia de las mareas, aunque algo desfasada (Fig. 2A). Esta influencia se ha observado en la señal intradiaria (Fig. 2B) y en el análisis espectral (Fig. 3), aunque de forma muy atenuada.

La evolución limnimétrica de la laguna de Torreguadiaro parece estar relacionada con la piezometría del acuífero cuaternario, del que recibiría aportes subterráneos. Pese a su situación geográfica, no se ha constatado la influencia de las mareas semidiurnas sobre el humedal. Esto posiblemente sea debido a la presencia de sedimentos finos en el fondo de la cubeta que amortiguan la señal de la onda mareal.

No obstante, este sector se está investigando actualmente por lo que se espera precisar aún más las relaciones existentes entre los distintos sistemas hidrológicos utilizando diversas metodologías, con una red de monitorización más completa y un periodo de estudio más amplio.

## Contribución de los autores

La instalación de equipos, la toma de medidas en campo y la elaboración de mapas y gráficos e interpretaciones preliminares han sido realizadas por A. Millán, investigador predoctoral. J.M. Gil ha participado en la instalación de los equipos. La supervisión de las investigaciones y la revisión del artículo se ha llevado a cabo por parte de J.M. Gil y B. Andreo.

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del grupo de investigación RNM-308 del PAIDI de la Junta de Andalucía. Ha sido financiado por el proyecto *LifeWatch ERIC INDALO*.

## Referencias

- Castillo Rodríguez, J.A. (2011). La organización del espacio en los valles del Guadiaro y Genal. Anuario de Estudios sobre Ronda y la Serranía, 9-46.
- Fernández-Ayuso, A., Aguilera, H., Guardiola-Albert, C., Rodríguez-Rodríguez, M, Heredia, J. y Naranjo-Fernández, N. (2019). Unraveling the hydrological behavior of a coastal pond in Doñana National Park (Southwest Spain). <https://doi.org/10.1111/gwat.12906>
- Gollonet, J. y Rodríguez, A. (2005). Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz. 211-221 pp. Campo de Gibraltar.
- IGME (1982). Estudio de los recursos hídricos subterráneos de la comarca del Campo de Gibraltar. Tomos I, III y IV. Geología e Hidrogeología. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid
- Morales-García, R. (2007). Atlas Hidrogeológico de Málaga. Guadiaro-Genal-Hozgarganta (M.A.S. 060.047). Tomo II, 149-154.
- Muñoz-Pérez, J.J., Gómez-Pina G. (2000). Recuperación ambiental del estuario del río Guadiaro (San Roque, Cádiz). V Jornadas Españolas de Costas y Puertos, 905-915.
- Nieto, J.M. (2020). Hidrogeología del bajo Guadalhorce y de los humedales de su desembocadura. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga. Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga
- Padilla, A. y Delgado, J. (2013). Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Programa Trasero 2.1. Departamento de ciclo hídrico, Diputación Provincial de Alicante, 87p.