

# Monitorización hidrológica y caracterización de la relación laguna-acuífero en las lagunas de los mantos eólicos de Doñana

*Hydrological monitoring and characterization of the relation aquifer-pond in the sand dune ponds of Doñana*

Miguel Rodríguez-Rodríguez, Ana Fernández-Ayuso, Francisco Moral y Rosario Caro

Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera km 1. 41013 (Sevilla) [mrodrod@upo.es](mailto:mrodrod@upo.es), [aferayu@upo.es](mailto:aferayu@upo.es), [fmormar@upo.es](mailto:fmormar@upo.es), [rosariocarov@gmail.com](mailto:rosariocarov@gmail.com)

## ABSTRACT

*In this work, a hydrogeological study of a set of coastal ponds, which are located in the Doñana Biological Reserve, has been carried out. These ponds are situated on quasi-stabilized dune depressions at different altitudes. Except for Santa Olalla pond, located at the lowest altitude, the ponds are temporary or seasonal. The water level evolution has been recorded with sensors installed in each of the ponds. With these data, inputs, outputs and water level storages have been quantified with a daily time-step during the period March 2016- September 2018. Moreover, surface water and groundwater samples have been taken during the same period in order to determine its hydrochemical facies. The water Balances revealed that most of the ponds were flow-through type. However, groundwater discharge is more important in some ponds than in others. Some ponds are rainfall-dependent and a major fraction of water outputs is groundwater recharge to the aquifer*

**Key Words:** water balance, hydrochemistry, coastal ponds, Doñana National Park.

## RESUMEN

*En este trabajo se ha realizado un estudio hidrogeológico en lagunas costeras de la Reserva Biológica de Doñana. Dichas lagunas se encuentran situadas en las depresiones de trenes de dunas cuasi estables del acuífero de los mantos eólicos de Doñana, a diferentes cotas. Se ha registrado la evolución del nivel de agua en las lagunas mediante sensores instalados en las cubetas lacustres y se han cuantificado las entradas, salidas y variaciones en el almacenamiento a escala diaria durante el periodo comprendido entre marzo de 2016 y septiembre de 2018. También se han tomado muestras de agua superficial y subterránea en piezómetros cercanos para analizar la facies hidroquímica del agua. Salvo la laguna de Santa Olalla, que es la situada a menor cota, el resto de las lagunas son estacionales o temporales. De los resultados de los balances de agua se deduce que la mayoría de las lagunas son de tránsito o flow-through. Sin embargo, la importancia de la descarga subterránea en algunas de las lagunas es mucho mayor que en otras. Hay sistemas que dependen fundamentalmente de las precipitaciones y cuyas salidas hídricas son, en su mayor parte, recarga o infiltración hacia el acuífero*

**Palabras Clave:** balances hídricos, hidroquímica, lagunas costeras, Parque Nacional de Doñana.

*Geogaceta*, 67 (2020), 87-90  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 01/07/2019  
Fecha de revisión: 17/10/2019  
Fecha de aceptación: 22/11/2019

## Introducción

La monitorización hidrológica de detalle de masas de agua superficial y subterránea ayuda a determinar las relaciones entre lagunas someras y acuíferos libres superficiales en distintos contextos hidrogeológicos. Este trabajo se centra en las lagunas de los mantos eólicos de Doñana y, más concretamente, en las lagunas peridunares más importantes de la Reserva Biológica de Doñana. Se trata de una zona protegida en el interior del Parque Nacional y gestionada por la Reserva Biológica (RBD-CSIC) que ocupa unas 3200 ha, entre la laguna del Charco del Toro al noroeste y la laguna de Sopotón, al sureste (Fig. 1). El resultado del análisis de información hidrológica e hidroquímica, junto con la obtención de datos meteorológicos para el establecimiento de balances de agua a escala diaria, permiten mejorar los modelos conceptuales

de funcionamiento hídrico de humedales, así como precisar las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas en estos ecosistemas, más aun teniendo en cuenta la preocupación ante la posible reducción del hidropereodo de las lagunas peridunares de Doñana en las últimas décadas (Díaz Paniagua *et al.*, 2015).

## Zona de estudio

Las lagunas peridunares objeto de este estudio se localizan en la MASb Manto eólico litoral de Doñana (Fig. 1a). La mayoría de estas lagunas son de tipo temporal, como es el caso de las lagunas de Taraje, Zahillo o Sopotón, aunque también existen lagunas permanentes, como la laguna de Santa Olalla que, con sus más de 25 ha, es la de mayor superficie (Fig. 1b; Custodio *et al.*, 2009). El funcionamiento hídrico de estas lagunas está íntimamente relacionado con el fun-

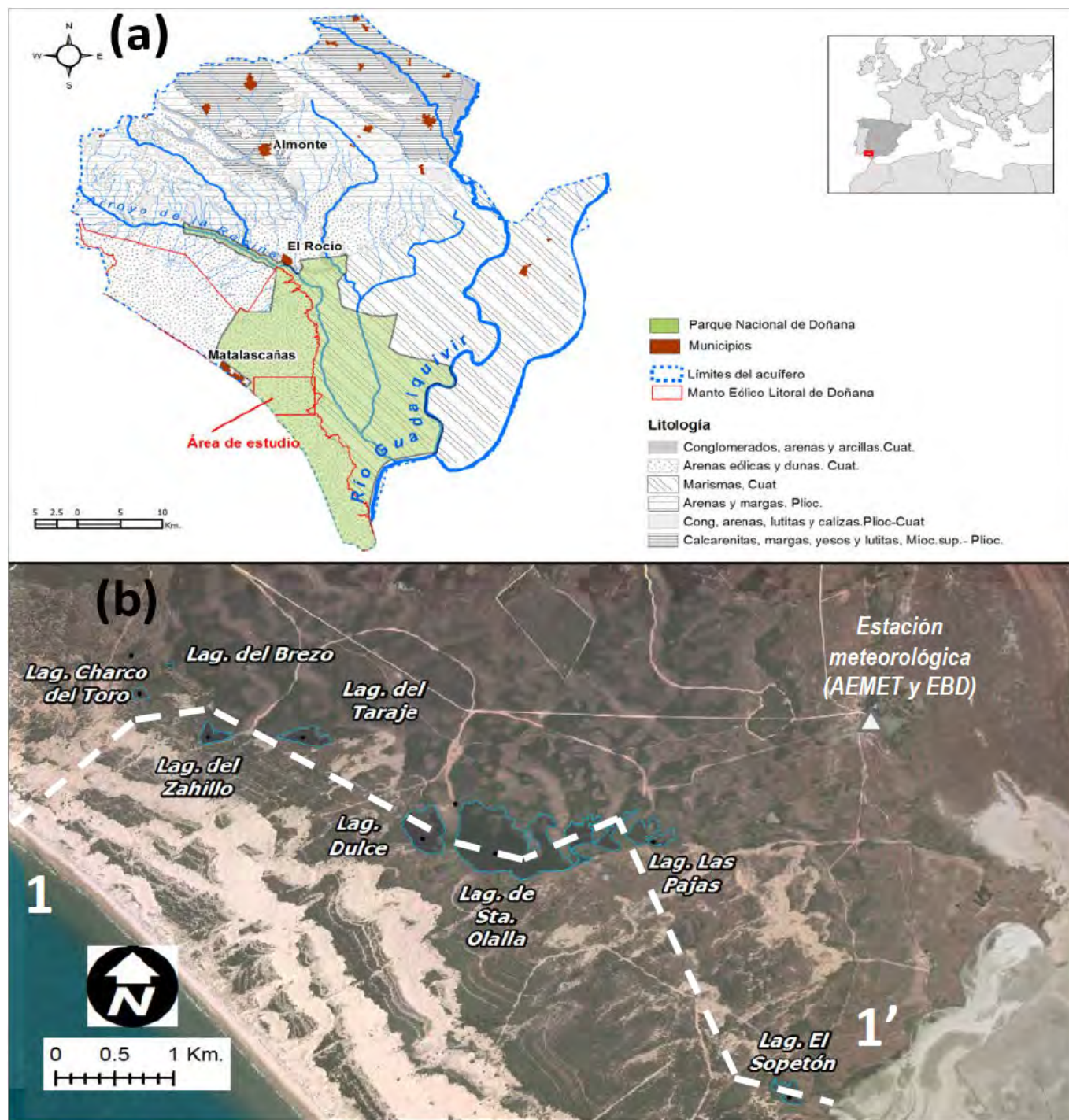
cionamiento del acuífero del manto eólico litoral.

## Metodología

Se han recogido y analizado datos hidrológicos, hidroquímicos, térmicos y meteorológicos entre los años 2015 y

Sensor	Registros	Nº
Diver-CTD	T-P-CE	1
Mini Diver	T-P	5
BaroDiver	T-P	3
Level Logger Decagon CTD 10	T-P	4
	T-P-CE	2

**Tabla 1.- Número y tipo de sensores utilizados en este estudio. T: temperatura; P: presión total; CE: conductividad eléctrica.**  
*Table 1.- Number and type of sensors employed in this study. T: temperature; P: total pressure; CE: electric conductivity.*



**Fig. 1.- a) Litología del acuífero de Doñana y área de estudio. b) Localización de las lagunas objeto de estudio. El corte 1-1' se muestra en la figura 4.**  
 Fig. 1.- a) Lithology of the Doñana aquifer, limits of the National Park and study area. b) Location of the studied ponds. Profile 1-1' is shown in figure 4.

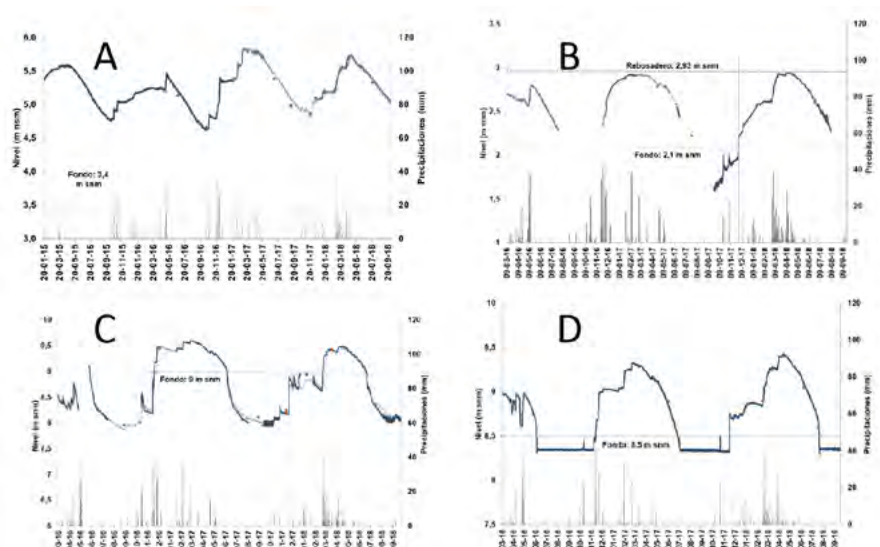
2018. Los datos de precipitaciones se han obtenido de la estación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), ubicada en el Palacio de Doñana, así como de la estación meteorológica de la Estación Biológica de Doñana (EBD), para obtener los parámetros necesarios (radiación, velocidad del viento, humedad relativa, etc.) para estimar la evaporación directa. Se han instalado diferentes sensores en la cubeta de las lagunas, en el zacallón (*i.e.*, excavación

somera) del Charco del Toro y en piezómetros cercanos (Tabla 1). Los resultados de los registros piezométricos no se han incluido en el presente trabajo.

En total se han analizado 80 muestras de aguas superficiales y 70 de aguas subterráneas tomadas en las diferentes lagunas y piezómetros estudiados durante diferentes campañas de muestreo. El tratamiento de datos hidroquímicos se llevó a cabo con el software AquaChem (Waterloo Hydrogeologic). Por otra parte, en

campo se midieron varios parámetros físico-químicos (C.E., temperatura y pH del agua) con una sonda multiparamétrica HACH HQ40®.

El balance de agua diario en las lagunas se ha realizado estimando la componente de entrada por precipitación directa gracias a las curvas hipsográficas de las lagunas y las salidas por evaporación cuando las lagunas estaban inundadas, siguiendo para ello la ecuación propuesta por McMahon *et al.* (2013). La



**Fig. 2.- Hidrogramas representativos de las lagunas peridunares durante el periodo de estudio. a) Santa Olalla. b) Sopotón. c) Zahillo. d) Taraje.**

*Fig. 2.- Representative graphs of the peridunar ponds during the studied period. a) Santa Olalla. b) Sopotón. c) Zahillo. d) Taraje.*

escorrentía necesaria para igualar el almacenamiento observado mediante el seguimiento de la evolución diaria del nivel se ha obtenido como resultado o incógnita del balance y se ha expresado como flujos entrantes/salientes (ver Tabla 2), de tal manera que en esta componente se integra tanto la descarga subterránea y subsuperficial como los posibles eventos de recarga o infiltración. La escorrentía superficial y/o difusa se considera despreciable, dadas las altas tasas de infiltración que se producen en las arenas de los mantos eólicos.

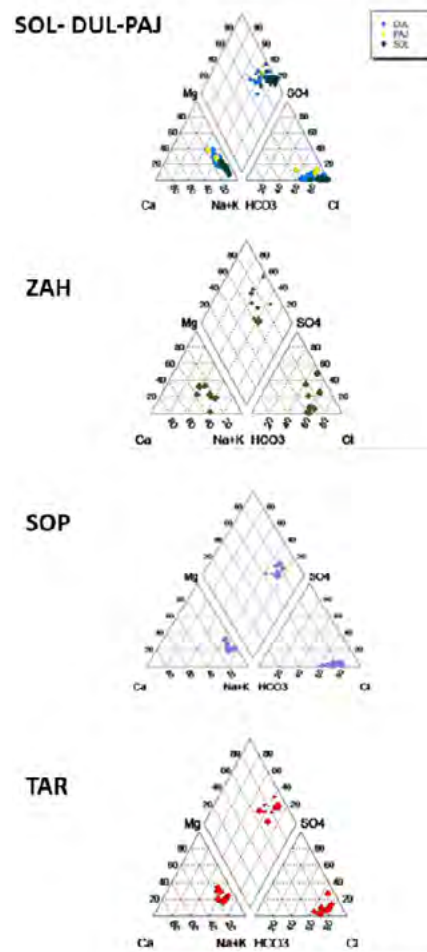
**Resultados y discusión**

En la figura 2 se pueden observar los hidrogramas de las lagunas de Santa Olalla, Sopotón, Zahillo y Taraje. Respecto a la evolución del nivel del agua y el hidropereodo, la laguna de Santa Olalla ha permanecido inundada durante todo el periodo de estudio. La laguna de Zahillo ha permanecido una media de 157 días al año inundada (43% del tiempo), su hidropereodo es temporal. La laguna de Taraje estuvo inundada 236 días al año (64% del tiempo). Por último, la laguna de Sopotón estuvo inundada 231 días al año (63% del tiempo). En ambos casos, el hidropereodo es estacional. La laguna del Charco del Toro permaneció seca durante todo el periodo de estudio.

En la figura 3 se pueden apreciar las características hidroquímicas del agua de las lagunas estudiadas. En general, predominan las facies cloruradas sódicas

en el agua de la mayoría de las lagunas. La laguna de Santa Olalla es la que presenta aguas más saladas y facies clorurado-sódicas incluso en invierno, llegando a superar concentraciones de más de 3500 mg/L tanto de Cl<sup>-</sup> como de Na<sup>+</sup>. Las otras tres lagunas (Zahillo, Sopotón y Taraje) presentan aguas, en general, cloruradas-sódicas o mixtas. La laguna de Zahillo es la que presenta aguas menos mineralizadas, facies mixtas y mayores variaciones estacionales de la concentración iónica, lo cual está probablemente relacionado con el lavado de las sales de la cubeta como consecuencia de una mayor tasa de recarga hacia el acuífero.

En la figura 4 se puede apreciar un perfil topográfico NO-SE, en el que se sitúan las lagunas que se han estudiado. También se han representado, de manera esquemática, los componentes del balance hídrico medio en cada una de las lagunas. La laguna situada en el sector noroccidental y a mayor cota (*i.e.*, Charco del Toro) tiene un régimen hídrico de recarga o infiltración y recibe su alimentación casi exclusivamente del agua de lluvia que cae sobre su cubeta. Permanece seca todo el año salvo, esporádicamente, cuando se producen precipitaciones intensas en la zona. Las lagunas de Zahillo y Taraje tienen un régimen hídrico en el cual las entradas se producen por precipitación y descarga subterránea y las salidas por evaporación y recarga al acuífero. En régimen natural y en equilibrio, la fracción de recarga o infiltración debía ser sustancialmente menor, lo cual



**Fig. 3.- Diagramas hidroquímicos de las aguas superficiales en las lagunas (DUL: Dulce; PAJ: Pajas).**

*Fig. 3.- Hydrochemical diagrams of the surface water of the ponds (DUL: Dulce; PAJ: Pajas).*

ha provocado una reducción tanto en el hidropereodo como en la superficie media de inundación en estas lagunas, tal y como se ha puesto de manifiesto recientemente en diversos estudios tanto hidrológicos (Fernández-Ayuso *et al.*, 2018), como ecológicos (Díaz Paniagua *et al.*, 2015). La laguna de Santa Olalla recibe el 26% de sus aportes hídricos por precipitación directa y el 74% restante por descarga subterránea (Tabla 2). Las salidas se producen fundamentalmente por evaporación y hay episodios de infiltración que tienen lugar normalmente en los meses de verano (Sacks *et al.*, 1992, Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2018). Finalmente, la laguna de Sopotón también recibe sus aportes hídricos por descarga subterránea (70%) y precipitación directa (30%) y las salidas se producen por evaporación, recarga y, a través de un rebosadero, hacia la marisma.

LAGUNA	PRECIPITACIÓN (DAM <sup>3</sup> /AÑO)	%	ESCORRENTÍA NETA* (DAM <sup>3</sup> /AÑO)	%	EVAPORACIÓN (DAM <sup>3</sup> /AÑO)
SANTA OLALLA	114	26%	332	74%	-469
SOPETÓN	15	30%	40	70%	-36/-19**
TARAJE	11	35%	21	65%	-32
ZAHÍLLO	4,2	36%	5,9	64%	-8,6

**Tabla II.- Componentes del balance hídrico medio en las lagunas estudiadas. \*La escorrentía neta es la resultante de las entradas (descarga) y salidas (recarga) de las lagunas durante el periodo de inundación de las lagunas. \*\*La laguna pierde 19 dam<sup>3</sup> por el rebosadero.**  
 Table II.- Components of the water balance during the studied period. \* Net runoff is the result of the water inputs (discharge) and outputs (recharge) on the ponds during the flooded period. \*\*Pond loses 19 dam<sup>3</sup> from the overflow.

**Conclusiones**

Los balances hídricos efectuados en las lagunas estudiadas ponen de manifiesto que existen aportes subterráneos continuados en las lagunas de Santa Olalla y Sopotón. En las lagunas de Zahillo y Taraje se produce escorrentía neta o descarga, pero las lagunas también aportan agua al acuífero (recarga) en determinados periodos. Asumiendo unas tasas de infiltración altas, dada la naturaleza del material sobre el que se sitúan las lagunas, las entradas subterráneas en estas

lagunas de *flow-through* o de tránsito constituyen entre un 50% y un 75% del total de los aportes hídricos al sistema.

Las aguas superficiales muestreadas resultaron tener facies cloruradas sódicas o mixtas en todas las lagunas. Respecto a la salinidad total, las aguas de la laguna de Santa Olalla fueron las de mayor salinidad (de salobres a salinas). Las aguas de las lagunas del Sopotón y Taraje resultaron ser salobres y las del Zahillo dulces. Tanto en la laguna de Zahillo como en la laguna del Taraje se ha detectado una alteración del régimen de funcionamiento hidrológico. Las lagunas tienen en la actualidad mayo-

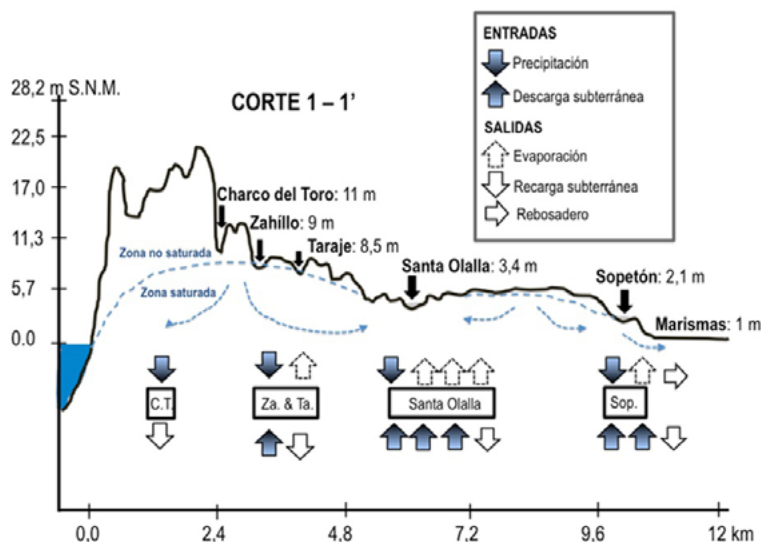
res tasas de recarga que las que tuvieron en régimen natural. Esta alteración tiene como consecuencia una reducción tanto del hidrop periodo como de la superficie media de inundación en ambas lagunas.

**Agradecimientos**

Este trabajo constituye una síntesis de parte de los resultados obtenidos gracias al convenio de colaboración: "Monitorización hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en humedales de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir" suscrito entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Universidad Pablo de Olavide. Agradecemos la revisión realizada por el profesor de la Universidad de Granada, J. Benavente Herrera y por la investigadora del IGME, C. Guardiola Albert. Los comentarios de ambos revisores han mejorado sustancialmente la calidad del presente trabajo.

**Referencias**

Custodio, E., Manzano, M., Montes, C. (2009). *Las aguas subterráneas en Doñana: Aspectos ecológicos y sociales*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, 243 p.  
 Díaz-Paniagua, C., Fernández-Zamudio, R., Serrano, L., Florencio, M., Gómez-Rodríguez, C., Sousa, A., Sánchez-Castillo, P., García-Murillo, P. y Siljeström, P. (2015). *El sistema de lagunas temporales del Parque Nacional de Doñana, una red de hábitats acuáticos singulares*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, 291 p.  
 Fernández-Ayuso, A., Rodríguez-Rodríguez, M. y Benavente, J. (2018). *Hydrological Sciences Journal* 63(15-16), 2048-2059.  
 McMahon, T.A., Peel, M.C., Srikanthan, R. y McVicar, T.R. (2013). *Hydrology and Earth System Sciences* 17(4), 1331-1363.  
 Rodríguez-Rodríguez, M., Fernández-Ayuso, A., Hayashi, M., y Moral-Martos, F. (2018). *Water*, 10(10), 1406.  
 Sacks, L.A., Herman, J.S., Konikow, L.F. y Vela, A.L. (1992). *Journal of Hydrology* 136(1-4), 123-154.



**Fig. 4.- Corte hidrogeológico (ver Fig. 1b) y esquema del funcionamiento hídrico de las lagunas Charco del Toro (C.T.); Zahillo y Taraje (Za. & Ta.); Santa Olalla y Sopotón (Sop.) de acuerdo con los resultados del balance hídrico (Tabla II).**  
 Fig. 4.- Hydrogeological profile (see Fig. 1b) and sketch of the hydrological functioning in Charco del Toro pond (C.T.); Zahillo and Taraje (Za. & Ta.); Santa Olalla and Sopotón (Sop.) according to the results from the hydrological balance (Table II).