

# Cálculo de parámetros hidrogeológicos mediante métodos de influencia mareal en el acuífero de arenas de Doñana (Huelva, España)

*Estimation of hydrogeological parameters by tidal influence methods in the recharge area of the sand aquifer in Doñana National Park (Huelva, Spain)*

Ana Fernández Ayuso y Miguel Rodríguez-Rodríguez

Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera km 1. 41013 (Sevilla). aferayu@upo.es, mrodrod@upo.es

## ABSTRACT

Through hourly monitoring of piezometric levels near Santa Olalla pond (Doñana Biological Reserve) tidal oscillations have been detected in two of the installed piezometers. The Doñana aquifer, which partly discharges into the ponds of the Doñana Biological Reserve, is a coastal aquifer. The tidal oscillation observed has been used to estimate values of transmissivity and permeability through the methods of tidal delay and tidal efficiency factor. Results obtained are within the values of hydrogeological parameters previously estimated for this area through traditional methods such as pumping tests.

**Key-words:** Tidal efficiency method, time lag method, coastal aquifer, transmissivity.

*Geogaceta*, 64 (2018), 51-54  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

## Introducción

El acuífero de Doñana ocupa una superficie de 2600 km<sup>2</sup>. Está dominado por depósitos de gravas y arenas del periodo plio-cuaternario que se extienden por las provincias andaluzas de Huelva, Sevilla y Cádiz (De Castro y Reinoso, 1997). En este trabajo nos centraremos en la Masa de Agua Subterránea Manto Eólico Litoral de Doñana (05.51.04), anteriormente denominado acuífero dunar (Vela, 1984) o acuífero de arenas, la cual abarca una superficie de unos 90 km<sup>2</sup> desde el Océano Atlántico hasta el área de marismas del Parque Nacional de Doñana. Esta sub-unidad hidrogeológica es de tipología libre. Las proximidades de la laguna de Santa Olalla se caracterizan por estar formadas por una matriz arenosa de más de 130 metros de profundidad y una capa de arcillas entre los

93 y los 123 metros de profundidad (Salvany *et al.*, 2010) (Fig. 1-B). Un basamento de margas miocenas constituye el muro del acuífero.

El Parque Nacional de Doñana (1080 km<sup>2</sup>), en el cual está incluida la Reserva Biológica de Doñana, se encuentra situado dentro de los límites del mencionado acuífero de Doñana. Nuestra zona de estudio se sitúa en el entorno de las lagunas de las arenas estabilizadas de la Reserva Biológica, a las cuales descarga el acuífero dunar. Otras salidas de agua del acuífero de mayor envergadura son las que se producen hacia el océano, así como el agua transpirada por la vegetación freatófita (Muñoz -Reinoso, 2001). La laguna de Santa Olalla, la única de carácter permanente de este conjunto, se sitúa a 2,5 km de la costa. Esta y otras lagunas de tipo estacional del mismo entorno se están estudiando en la actualidad

## RESUMEN

A través de la monitorización horaria de niveles piezométricos próximos a la laguna de Santa Olalla (Reserva Biológica de Doñana) se han detectado oscilaciones mareales en dos de los piezómetros instalados. El acuífero de Doñana, el cual descarga en parte en las lagunas de la Reserva Biológica de Doñana, es un acuífero costero. Las oscilaciones mareales observadas nos han permitido estimar valores de transmissividad y permeabilidad en la zona de estudio a través de los métodos de retraso de marea y de eficiencia de mareas. Los resultados obtenidos se encuentran en el rango de los estimados previamente para esta zona con otros métodos como ensayos de bombeo.

**Palabras clave:** Método de eficiencia de marea, método de retraso de mareas, acuífero costero, transmissividad.

Recepción: 9 de febrero de 2018  
Revisión: 19 de abril de 2018  
Aceptación: 25 de abril de 2018

desde el punto de vista hidrogeológico con el objetivo de mejorar el conocimiento existente entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas en esta zona. De forma indirecta, se pretende establecer si la presión antrópica sobre el acuífero por los bombeos de agua subterránea, tanto para abastecimiento en la urbanización costera de Matalascañas, como para fines agrícolas en zonas más alejadas, puede tener repercusiones en el mantenimiento de nivel de agua en las lagunas estudiadas. Con estos objetivos se han instalado una serie de sensores, tanto en piezómetros de entre 20 y 2 m de profundidad, como en lagunas, para monitorizar a escala trihoraria las evoluciones del nivel existentes y en consecuencia las relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas. En concreto, para este estudio, se han utilizado dos sensores instalados en piezómetros de la Confederación Hidro-



**Fig. 1.- A)** Ubicación de los piezómetros monitorizados en las proximidades de las lagunas Dulce y Santa Olalla, en un entorno de arenas estabilizadas y a tan solo 2,5 km del Océano Atlántico. En el margen superior derecho se muestra la localización del mareógrafo del cual se han obtenido los datos mareales. **B)** Columna litológica de un sondeo profundo ubicado en el entorno de Santa Olalla y que sirve de referencia para entender la litología de la zona (modificado de Salvany *et al.*, 2010)

*Fig. 1.- A) Location of the monitored piezometers in the proximity of Dulce and Santa Olalla ponds, only 2.5 km from the Atlantic Ocean. The location of the tide gauge from which tidal data have been obtained is shown in the upper right corner. B) Lithological column of a deep piezometer located in the surroundings of the Santa Olalla pond (modified from Salvany *et al.*, 2010).*

gráfica del Guadalquivir (CHG) (Fig. 1A). En dichos sensores se han detectado oscilaciones que responden a la influencia de las mareas. Esta circunstancia ha permitido aplicar los métodos de retraso de mareas ( $R$ ) y eficiencia de mareas ( $EM$ ) para estimar los parámetros hidráulicos de transmisividad ( $T$ ) y permeabilidad ( $K$ ) con un coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) dado. Este tipo de metodologías, poco empleadas, pero utilizadas ampliamente por diversos autores desde los años 50 (*e.g.*, Ferris, 1951; Carr y Van Der Kamp, 1969) sirven como complemento de tecnologías más clásicas empleadas con el mismo fin.

### Metodología

Los puntos denominados como PDUL y PSOLW, de 21 y 17 m de profundidad respectivamente, y situados a una distancia de 2500 y 2700 m del Océano Atlántico, han sido los utilizados para aplicar las metodologías de  $R$  y  $EM$ . Ambos sensores fueron programados para medir de forma horaria las oscilaciones del nivel piezométrico durante dos semanas (28/11/2017-13/12/2017). Las medidas tomadas por estos sensores denominados Diver® han sido compensadas barométricamente para obtener valores finales de nivel piezométrico y corregidas en caso de errores puntuales. Mediante el acceso a la web de

Puertos del Estado ([www.portus.es](http://www.portus.es)) se han obtenido los datos necesarios para la comparación de los niveles piezométricos con el nivel del mar. Se han empleado los valores de nivel del mar registrados por el mareógrafo de Bonanza 2, situado en la desembocadura del río Guadalquivir (Cádiz) como nivel de referencia, por ser aquel que se encuentra más próximo (24 km) a nuestra zona de estudio (Fig. 1A). Se ha empleado un periodo de tiempo de tres días, desde el 7 de diciembre de 2017 a las 00:00 h hasta el 9 de diciembre a las 23:00 h del mismo año, con intervalos horarios. Durante este intervalo de tiempo no se registraron precipitaciones.

La estimación de los parámetros hidráulicos de transmisividad y permeabilidad en función de los datos de marea se ha llevado a cabo aplicando las ecuaciones del modelo de respuesta a las mareas desarrolladas por Sánchez-Úbeda *et al.* (2012) y aplicadas por Sánchez Úbeda *et al.* (2013) y Nieto-López *et al.* (2016). Dichas ecuaciones son:

A) Retardo de la oscilación del nivel piezométrico respecto a la oscilación de las mareas:

$$R = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{t_0 S}{\pi T}} \quad (1)$$

donde  $R$  es el retardo o *lag* (horas) que se produce entre la señal de marea y la del nivel piezométrico,  $x$  es la distancia del punto a la línea de costa (en metros), y  $t_0$  es el periodo de oscilación de la marea (12,5 horas). El valor de transmisividad se obtiene a través de valores de coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) dados.

B) Eficiencia de mareas

$$EM = \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi x^2 S}{t_0 T}}\right) \quad (2)$$

El valor de  $EM$  es el cociente entre la amplitud de la oscilación del nivel piezométrico y la amplitud de mareas. Los valores de amplitud de la oscilación del nivel piezométrico y de las mareas se han obtenido mediante el método de amplitud media (Jha *et al.*, 2003), calculando los valores medios de amplitud entre los máximos y mínimos correlativos en el periodo de estudio. A partir de los valores de transmisividad, se han calculado la permeabilidad ( $K=T/b$ , siendo  $b$  el espesor saturado).

Estas expresiones se desarrollaron para condiciones confinantes (Ferris, 1951), no obstante, se pueden aplicar a nuestro caso de acuífero libre cuando la razón entre la

fluctuación del nivel piezométrico y el espesor saturado es menor a 0,02 (Roscoe Moss, 1990).

## Resultados y discusión

Tal y como se observa en la figura 2, la influencia mareal es indiscutible en los piezómetros del área estudiada. Se distingue cómo las variaciones de nivel piezométrico comparten el mismo periodo que las oscilaciones mareales (12,5 horas). Asimismo, se puede observar la diferencia de orden entre la amplitud de los niveles piezométricos de PSOLW y PDUL, de 0,029 m y 0,031 m respectivamente y la amplitud mareal en este punto del Océano Atlántico, de 2,2 m de media.

Se ha considerado que el retardo entre las mareas y PSOLW y PDUL (13,16 h y 13,35 h respectivamente) no corresponde a la pleamar directamente anterior, sino que, dada la distancia entre los puntos y la costa y tomando como referencia valores anteriores, el retardo sería atribuible a la marea que precede a la anterior (es decir 12,5 horas antes). Este valor se podría afinar en un futuro si tuviese lugar alguna marea especialmente significativa que produjese una respuesta identificable en los niveles piezométricos medidos.

Los valores de coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) empleados para el cálculo de  $T$  y  $K$ , han sido 0,01 y 0,001 (Sánchez Úbeda *et al.*, 2013).

En ensayos de bombeo anteriores en la zona se estimaron valores incluso más bajos de  $S$ , de entre  $2 \cdot 10^{-4}$  y  $2 \cdot 10^{-3}$  en los primeros metros del acuífero, (IGME, 1992).

Los valores de  $T$  obtenidos por la aplicación de ambos métodos se muestran en la tabla I. Se observa cómo los resultados obtenidos dependen fundamentalmente de los valores de  $S$  que se han otorgado para cada caso. Del mismo modo, se distinguen diferencias de un orden de magnitud entre los resultados de  $T$  obtenidos mediante el método de R (900 y 9975  $m^2/d$ ) y el método de EM (2329 - 23291  $m^2/d$ ), lo cual se ha observado también en otros trabajos mencionados anteriormente (Sánchez-Úbeda *et al.*, 2013, Nieto-López *et al.*, 2016).

El valor de espesor saturado utilizado en el cálculo de la permeabilidad, a partir de los valores de transmisividad obtenidos, ha sido de 100 metros, ya que se trata de un valor medio del espesor del acuífero libre formado por arenas, mos-

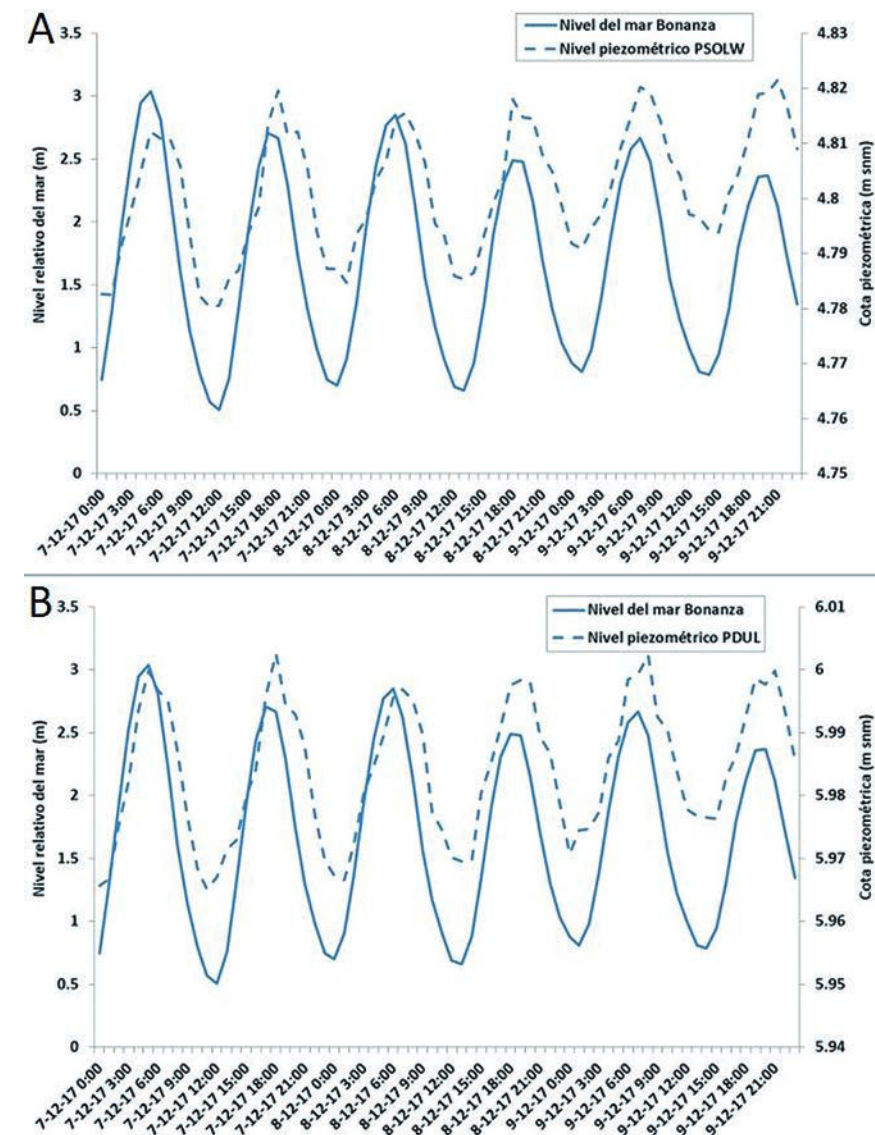


Fig. 2.- Registro de nivel relativo del mar y del nivel piezométrico en PSOLW (A) y PDUL (B), respectivamente, del 07-12-2017 a las 00:00 horas al 09-12-2017 a las 23:00 horas con una resolución horaria

Fig. 2.- Relative sea level and water table dataset in PSOLW (A) y PDUL (B) from 2017-12-07 at 00:00 h to 2017-12-09 at 23:00 h, at hourly intervals.

trado en la figura 2. Los valores de  $K$  varían entre 9 m/d y 250 m/d.

Los valores de  $T$  y  $K$  de bibliografía para esta zona de estudio son muy diversos, ya que existen algunos autores que separan el acuífero de arenas en una unidad inferior y una superior separadas por una capa de arcillas de 30 metros de potencia y le otorgan parámetros diferentes a cada una de ellas (Lozano, 2007). Los resultados de transmisividad obtenidos en este trabajo están dentro de los 100  $m^2/d$  y 3000  $m^2/d$ , propuestos por el IGME (1992), y son de menor orden de magnitud que los obtenidos en otros acuíferos costeros (Sánchez-Úbeda *et al.*, 2013, Nieto-López *et al.*, 2016). Los valores de  $K$  del rango más bajo calculados por los métodos de R y EM están dentro de los expuestos por Guar-

diola-Albert *et al.* (2010) de entre 0,001 m/d y 30 m/d para el acuífero.

Por otro lado, oscilaciones en el nivel piezométrico de menos de 1 cm de amplitud fueron detectadas en 1995 en un piezómetro próximo al palacio de Doñana, a 5800 metros de la costa (Oliás-Álvarez, 1995). La diferencia entre esta amplitud y la detectada por nuestros sensores, indicaría que la señal de la marea se atenúa a medida que aumenta la distancia a la costa.

## Conclusiones

La influencia de la oscilación de la marea ha sido detectada en dos piezómetros situados a escasos metros de distancia de la laguna de Santa Olalla (Reserva

Punto	x (m)	Amplitud mareas (m)	Amplitud np (m)	Retardo (h)	EM	Método R		Método EM		
						S	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)	T (m <sup>2</sup> /d)	k (m/d)
PSOLW	2690	2,2	0,029	13,16	0,013	0,001	997	10	2329	23
						0,01	9975	95	23291	230
PDUL	2573	2,2	0,031	13,35	0,014	0,001	900	9	2198	22
						0,01	9002	90	21981	220

**Tabla I: Valores de Transmisividad (T) y permeabilidad (K) calculados mediante los métodos de retraso de mareas (R) y de eficiencia de mareas (EM) para cada punto estudiado. "np" se utiliza como acrónimo de "nivel piezométrico".**

*Table I: Transmissivity (T) and permeability (K) values calculated according to the methods of time lag (R) and tidal efficiency factor (EM) in the studied points. "np" is referred to "piezometric level".*

Biológica de Doñana) y a menos de 3 km del Océano Atlántico.

Los valores de transmisividad (T) y permeabilidad (K) obtenidos mediante los métodos de Retraso (R) y Eficiencia de Mareas (EM) difieren considerablemente, debido a la sensibilidad de cada método a los valores de coeficiente de almacenamiento y retardo de mareas. El método R arroja resultados más similares a los estimados en estudios previos, por tanto, se considera el más adecuado para la estimación de estos parámetros hidráulicos, al menos para la subunidad hidrogeológica del acuífero dunar, objeto del presente estudio. Por otro lado, los valores obtenidos de T (cerca de 900 m<sup>2</sup>/día) y K (cerca de 10 m/d) con el parámetro S igual a 0,001 son similares a los estimados por otros autores en la misma zona de estudio.

Mediante este tipo de métodos, es posible establecer valores de conductividad hidráulica representativos de la zona existente entre el piezómetro y la costa en lugar de datos puntuales, como arrojan los ensayos de bombeo, técnica empleada habitualmente.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio entre la Confederación Hidro-

gráfica del Guadalquivir y la Universidad Pablo de Olavide "Monitorización hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en humedales de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (lagunas de los Mantos Eólicos de Doñana)". Parte de los resultados obtenidos y su discusión se ha llevado a cabo en el marco del Proyecto I+D+I CLIGRO (CGL2016-77473-C3-1-R). Agradecemos a José Manuel Nieto López y a Juan Pedro Sánchez Úbeda su colaboración en el análisis de los datos mediante estos métodos. Por último, agradecemos a los revisores sus contribuciones para la mejora de este manuscrito.

## Referencias

- Carr, P.A. y Van Der Kamp, G. S. (1969). *Water Resources Research*, 5, 1023-1031.
- De Castro, F. y Muñoz Reinoso, J. M. (1997). *Water Research*, 31, 2586-2596.
- Ferris, J.G. (1951). *International Association of Scientific Hydrology*, 33, 148-155.
- Guardiola-Albert, C., García Bravo, N., Mediavilla, C. y Martín Machuca, M. (2010). *Boletín Geológico y Minero*, 120(3), 361-376.
- IGME (1992). *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotecnia*. Ed. IGME. 64 pp + 2 mapas.
- Jha, M.K., Kamii, Y. y Chikamori, K. (2003). *Water Resources Management*, 17, 69-88.
- Lozano (2007). *Las aguas subterráneas en Los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Muñoz-Reinoso, J.C. (2001). *Journal of Hydrology*, 242, 197-209.
- Nieto López, J.M., Andreo Navarro, B. y Mudarra Martínez, M. (2016). *Geogaceta* 59, 39-42.
- Olías Álvarez, M. (1995). *Evaluación de la recarga y comportamiento de la zona no saturada en el Acuífero Almonte-Marismas (Huelva)*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Salvany, J.M., Mediavilla, C. y Rebollo, A. (2010). *Estudios Geológicos*, 66(2), 209-225.
- Roscoe Moss Company (1990). *Handbook of Ground Water Development*. John Wiley and Sons, N.Y. 276-312.
- Sánchez Úbeda, J.P., Calvache-Quesada, M.L.C., López-Chicano, M., Duque, C. y Martín Rosales, W. (2012). *Geogaceta* 53, 121-124.
- Sánchez Úbeda, J.P., Calvache Quesada, M.L., Duque, C., y López Chicano, M. (2013). *Geogaceta* 54, 131-134.
- Vela, A. (1984). *Estudio preliminar de la hidrogeología e hidrogeoquímica del sistema de dunas móviles y flecha litoral del Parque Nacional de Doñana*. Tesis de Máster. Universidad Complutense de Madrid.