

# Filtrado de datos de niveles piezométricos en acuíferos costeros libres mediante procesamiento de señales ondulatorias

*Filtering of groundwater head data in unconfined coastal aquifers via processing of wave signals*

Juan Pedro Sánchez Úbeda, María Luisa Calvache Quesada y Manuel López Chicano

Departamento de Geodinámica. Avda. Fuentenueva s/n 18071. Universidad de Granada. 18071 Granada, España.  
juampesu@ugr.es, calvache@ugr.es, mlopezc@ugr.es

## ABSTRACT

An effective method to remove the tide effects from head data recorded in two piezometers of different depth has been developed. The method has been applied in the discharge zone of Motril-Salobreña coastal aquifer (South Eastern Spain) for two data time intervals (one month and one year). According to this method the groundwater head is handled like a wave composed by several main components, which are defined in terms of amplitude, frequency and phase. These significant tide components are extracted from the original tide-perturbed head by low and high pass filters of frequency, applying software tools of signal processing. The obtained signal represents the non-perturbed head level, which allows to delve into the non-tide water head affections that can be detected in the discharge zone of coastal aquifers, besides of the reinterpretation of pumping tests data effected by the tide.

**Key-words:** Tide, coastal aquifer, groundwater head, tide harmonics, discharge zone.

## RESUMEN

Se ha desarrollado un método efectivo con el cual eliminar los efectos de marea de los datos de niveles piezométricos registrados en dos piezómetros de diferente profundidad. El método ha sido aplicado en la zona de descarga del acuífero costero de Motril-Salobreña (SE de España), para dos intervalos temporales de datos (un mes y un año). Según este método se considera el nivel piezométrico afectado por la marea como una onda formada por varios componentes principales, definidos en términos de amplitud, frecuencia y fase. Estos componentes principales de marea son extraídos de la señal piezométrica mediante filtros de paso de baja y alta frecuencia, aplicando herramientas de software de procesamiento de señales. La señal obtenida corresponde al nivel no afectado por la marea, lo cual permite profundizar en las afecciones no mareales del nivel piezométrico que puedan ser detectadas en las zonas de descarga de acuíferos costeros, así como la reinterpretación de ensayos de bombeo afectados por la marea.

**Palabras clave:** Marea, acuífero costero, nivel piezométrico, armónicos de marea, zona de descarga.

Geogaceta, 57 (2015), 135-138.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 29 de junio de 2014  
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2014  
Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2014

## Introducción

La perturbación mareal en las medidas de nivel piezométrico cerca de la línea de costa es, en inicio, una cuestión a abordar con dos enfoques principales. Por una parte, existe la posibilidad de crear modelos analíticos y numéricos con el fin de derivar parámetros del acuífero a través de la relación entre la marea y el nivel piezométrico medido. Por otra parte, esta relación entre perturbación y consecuente oscilación del nivel piezométrico permite también analizar la configuración de la zona de descarga, teniendo en cuenta que la oscilación mareal en las zonas de descarga produce un ensanchamiento de la zona de mezcla debido a un incremento local de los valores de dis-

persividad (Cirpka y Attinger, 2003; Guarracino *et al.*, 2012). Sin embargo, los cambios en los niveles piezométricos en la zona de descarga asociados a recarga, bombeo o cualquier otra modificación general en las condiciones del acuífero podría constituir un tercer enfoque de la influencia mareal, que puede ser abordado a través del estudio de los niveles piezométricos cercanos a costa sin las perturbaciones provocadas por la marea. El presente estudio tiene como objetivo la obtención de un método simple pero eficiente para filtrar los datos piezométricos cercanos al borde costero de la oscilación mareal, considerando solo las componentes principales de marea detectadas en el registro de dichos niveles. El método ha sido aplicado sobre datos

correspondientes a dos profundidades distintas (en un mismo punto), con el fin de constatar también la influencia directa de la profundidad del registro piezométrico sobre la observación de las oscilaciones mareales.

## Antecedentes

Diferentes estudios han sido realizados para eliminar las oscilaciones mareales registradas en los puntos de control de nivel piezométrico cercanos al mar mediante aproximaciones matemáticas con mayor o menor precisión. Nielsen (1990) desarrolló un modelo analítico basado en las ecuaciones de Boussinesq y diferentes soluciones analíticas. La comparación de éstas con las mediciones de nivel presentan grandes dis-

TIDE							P1						
Tide ID	F (h <sup>-1</sup> )	P (h)	A (m)	A_Err (m)	Pha (°)	snr	Tide ID	F (h <sup>-1</sup> )	P (h)	A (m)	A_Err (m)	Pha (°)	snr
SA	0,0001	8764,24	0,0594	0,013	359,38	22	SSA	0,0002	4382,12	0,0636	0,03	119,17	4,5
SSA	0,0002	4382,12	0,0192	0,012	40,41	2,5	K1	0,0418	23,93	0,012	0,001	182,02	150
MF	0,0031	327,86	0,0059	0,009	352,96	0,4	N2	0,0790	12,66	0,0109	0,001	118,63	160
O1	0,0387	25,82	0,0199	0,001	121,98	210	M2	0,0805	12,42	0,0529	0,001	122,42	4000
P1	0,0416	24,07	0,0115	0,001	151,07	89	S2	0,0833	12,00	0,0163	0,001	105,54	340
K1	0,0418	23,93	0,0324	0,001	155,94	610	P2						
N2	0,0790	12,66	0,032	0,002	31,87	230	Tide ID	F (h <sup>-1</sup> )	P (h)	A (m)	A_Err (m)	Pha (°)	snr
M2	0,0805	12,42	0,1573	0,002	48,62	410	SSA	0,0002	4382,12	0,052	0,023	121,14	5,2
S2	0,0833	12,00	0,0619	0,002	73,97	860	K1	0,0418	23,93	0,0035	0,001	180,42	23
K2	0,0836	11,97	0,0172	0,003	69,61	32	N2	0,0790	12,66	0,004	0,001	115,71	56
M4	0,1610	6,21	0,0166	0,001	160,39	310	M2	0,0805	12,42	0,0194	0,001	121,16	1400
MS4	0,1638	6,10	0,0117	0,001	226,45	120	S2	0,0833	12,00	0,005	0,001	49,68	77

Tabla I.- Componentes armónicos principales detectados en los registros de marea, P1 y P2.

Table I.- Principal harmonic components detected in tide, P1 and P2 measurement data.

crepancias, principalmente debidas a la formación de una franja preferencial de descarga cercana a la costa. Erskine (1991) obtiene valores de difusividad (razón entre transmisividad y coeficiente de almacenamiento), basándose en los valores calculados para los factores de retardo y eficiencia de mareas, con lo cual desarrolla un proceso de filtrado de los datos de nivel piezométrico usando dichos factores, y los resultados presentan imperfecciones debidas a efectos no mareales. Trefry y Johnston (1998) aplican técnicas de ajuste a mínimos cuadrados para eliminar la oscilación mareal de los datos de ensayos de bombeo, pero al aplicarlo a periodos temporales de datos de varios días, los resultados no muestran un ajuste aceptable o no consiguen un filtrado completo. En cualquier caso, estos métodos han sido aplicados a periodos temporales de datos de varios días a un mes, y siempre en acuíferos someros (algunas decenas de metros), con morfologías costeras muy específicas o sistemas multicapa. Li y Jiao (2003), Bye y Narayan (2009) y Zhou *et al.* (2013) proponen métodos enfocados en los efectos de la marea sobre la configuración de la interfase agua dulce-agua salada y la obtención de predicciones de niveles freáticos, pero no en la limpieza o filtrado de las medidas de nivel piezométrico.

## Metodología

Este estudio está basado en el procesamiento de una señal a través de la detección de las frecuencias y amplitudes de los diferentes componentes o armónicos de la marea presentes en el nivel piezométrico medido. Para ello se han utilizados los datos mareales correspondientes al mareógrafo

del puerto de Motril (Granada), con resolución temporal horaria, disponibles a través de *Puertos del Estado (Ministerio de Fomento)*. El registro de niveles piezométricos se ha realizado también con resolución temporal horaria, en dos piezómetros (P1 y P2), situados a 300 m del borde costero, entubados con 3 m de tramo filtrante solo en su parte más profunda, a -128 y -34 m s.n.m., respectivamente. Estos están muy cercanos uno del otro (3 m entre ambos), con lo cual podemos tratar ambos como un único punto en el que el nivel piezométrico es medido a dos profundidades diferentes. Los materiales que atraviesan ambos puntos de muestreo son principalmente gravas y arenas, con alguna intercalación de mayor componente arcillosa a limosa (de poca potencia, no confinante). En los dos puntos el tramo filtrante fue situado frente a niveles gravosos importantes y semejantes, de alta permeabilidad.

El primer paso del proceso de filtrado consiste en calcular los principales componentes armónicos en términos de frecuencia, amplitud y fase en el registro mareal y de nivel piezométrico a sendas profundidades, lo cual nos permite reconocer todas las componentes mareales que afectan a estos últimos. Este procesamiento se lleva a cabo mediante la aplicación de un código modificado, basado en el código T\_TIDE (Pawlowicz *et al.*, 2002). Los resultados obtenidos corresponden a los valores de frecuencia (F), amplitud (A), fase (Pha) y factor snr ("Signal to Noise Ratio"). Este último indica cuán significantes son cada uno de los componentes de marea detectados en el análisis de la señal piezométrica (cuando snr > 2).

Los siguientes pasos consisten en el aislamiento de estos componentes mediante

el filtrado de la señal piezométrica original, a través de la aplicación de filtros de señal de paso bajo y alto, basados en el *Desarrollo en series de Fourier*. Se utiliza también análisis de densidad espectral para ambas series de datos piezométricos, con el fin de confirmar las principales frecuencias mareales presentes. Estos componentes o armónicos de diferentes frecuencias son finalmente eliminados de la señal original de nivel mediante la herramienta *Wavelet* de procesamiento de señales de *MATLAB*. La señal final obtenida representaría el nivel piezométrico no perturbado por la oscilación mareal.

## Resultados y discusión

Los resultados principales han sido obtenidos para dos intervalos temporales diferentes (un mes y un año). El ajuste de las componentes mareales se realizó sobre el intervalo temporal mayor, con el propósito de obtener todos los armónicos mareales detectables a partir del registro horario de mareas. El filtrado de los datos y limpieza de la señal se realizó de forma separada para cada intervalo temporal, los cuales han sido posteriormente comparados entre sí para verificar que el método es válido, independientemente del intervalo temporal al que se aplica. La Tabla I muestra los componentes mareales más significativos, tanto en la marea como en los piezómetros P1 y P2 (resultados de T\_TIDE), donde las columnas indican: identificación de la componente de marea (Tide ID), frecuencia (F), periodo (P), amplitud (A), error de estimación de la amplitud (A\_Err), fase (Pha) y factor snr. Los componentes ajustados en P1 y P2 son consistentes con las frecuencias de marea obtenidas, incluyendo la componente

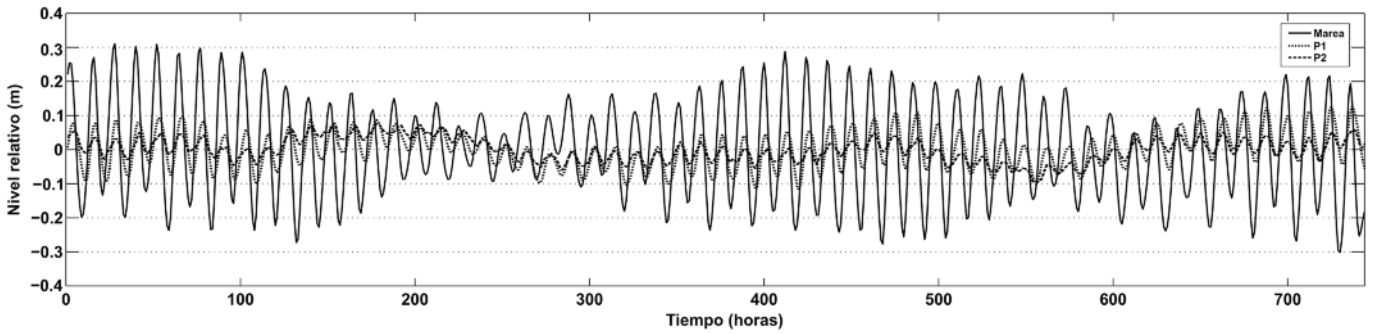


Fig. 1.- Niveles relativos de marea, P1 y P2 para agosto de 2012 (intervalo mensual).

Fig. 1.- Relative levels of tide, P1 and P2 for august 2012 (interval of one month).

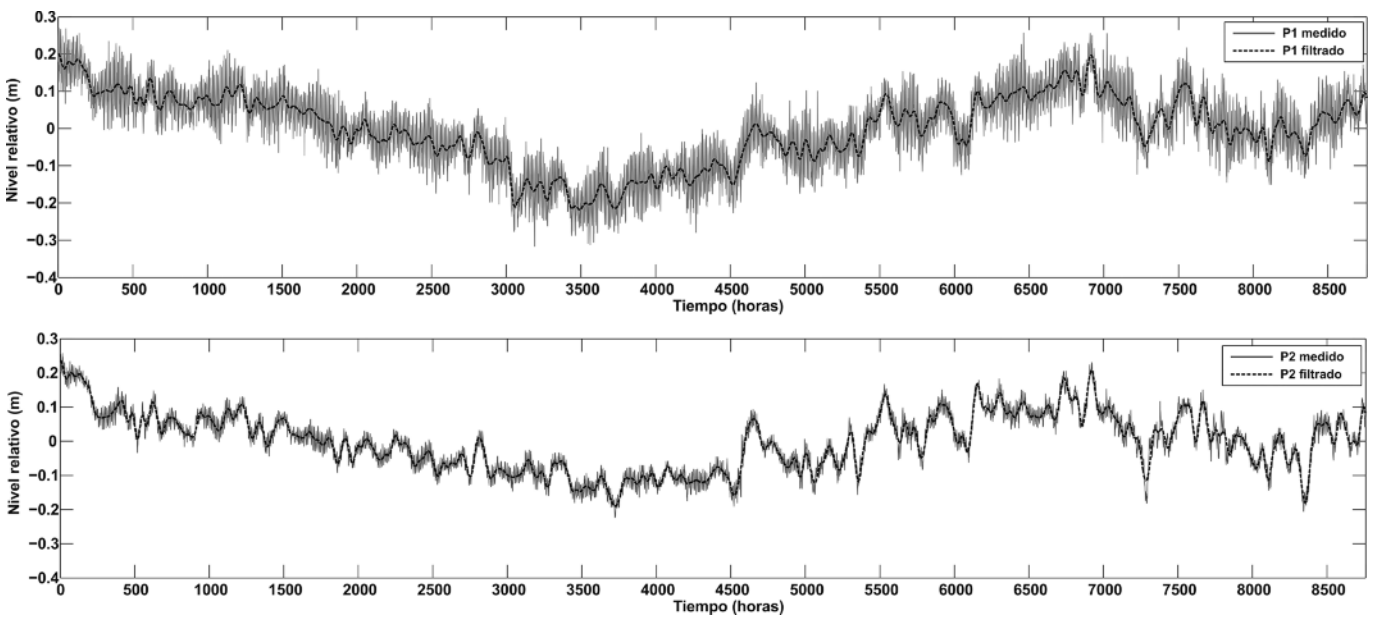


Fig. 2.- Niveles originales y filtrados en los piezómetros P1 (arriba) y P2 (abajo) entre 21/03/2012 y 21/03/2013 (intervalo anual).

Fig. 2.- Original and filtered levels in piezometers P1 (upper) and P2 (lower) from 21/03/2012 to 21/03/2013 (interval of one year).

mareal semianual (SSA: "Solar Semi Anual"), con un periodo de 4382 horas. En el caso de P1 y P2, solo son detectados los componentes de marea que se muestran en la tabla (cuando  $snr > 2$ ), quedando muy atenuados o eliminados en su propagación a través del acuífero el resto de componentes detectados en el registro de marea. Como se muestra en la figura 1, la frecuencia mareal más notable, tanto en P1 y P2 corresponde a las oscilaciones semidiurnas, para el intervalo temporal de un mes ( $M2$ ,  $M2$  y  $S2$  para P1 y P2 en Tabla I), corroborado mediante el análisis de densidad espectral. La componente de marea semimensual se detecta más ligeramente que la componente de periodo semidiurno (principalmente  $M2$ ), de modo que mareas vivas y muertas en este caso quedan más enmascaradas. No obstante, la oscilación diurna ( $K1$  para P1 y P2 en Tabla I), aunque no detectable visualmente en la figura 1, re-

sulta más patente en el análisis que la semimensual.

En la figura 2 se muestran las señales filtradas obtenidas para los puntos de medida P1 y P2, junto con el nivel piezométrico original en cada caso, para el intervalo temporal registrado de un año. Se observa que la tendencia general a nivel anual es similar en ambos casos. Sin embargo, se detectan diferencias entre P1 y P2 en relación a sus diferentes profundidades de registro. La amplitud media de la marea en esta zona del Mediterráneo es del orden de 0,6 m, y ésta induce una amplitud en el nivel piezométrico de 0,1 m (P2) a 0,3 m (P1) en función de la profundidad de medida. Así, la señal correspondiente a P1 presenta un componente importante de ruido y una alta afección mareal, mientras que en P2 aparece más amortiguada, debido principalmente al carácter no confinado del acuífero y la variación del coeficiente de almacenamiento

en profundidad (Erskine, 1991). Los filtros aplicados limpian la señal piezométrica original a diferentes niveles de frecuencia, permaneciendo al final las frecuencias bajas no mareales. Se pueden apreciar además diferencias entre el filtrado de ambos intervalos de tiempo (un mes y un año), lo cual implica el tratamiento de la señal anual a frecuencias más bajas que en el caso de la señal mensual. Sin embargo, los resultados obtenidos con este método dan como resultado un ajuste congruente entre los resultados para ambos intervalos temporales, comparando el mismo mes del intervalo corto dentro del intervalo anual, como se muestra en la figura 3.

Por otra parte, el método puede ser validado realizando una comparación general, como se muestra en la figura 4, entre el nivel piezométrico (P1) ya filtrado de las oscilaciones mareales, con el registro de nivel en un punto cercano pero no perturbado

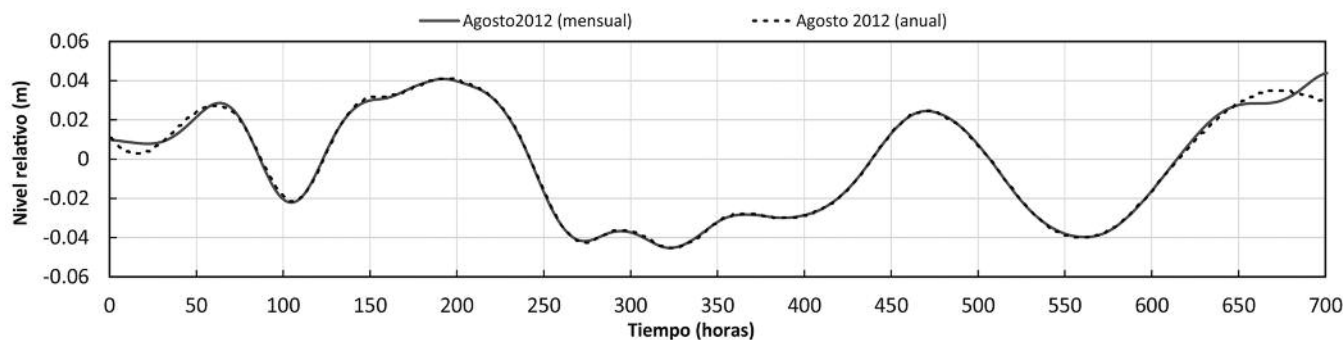


Fig. 3.- Comparación de los resultados de filtrado entre ambos intervalos temporales utilizados.

Fig. 3.- Comparison of filtering results between both time intervals used.

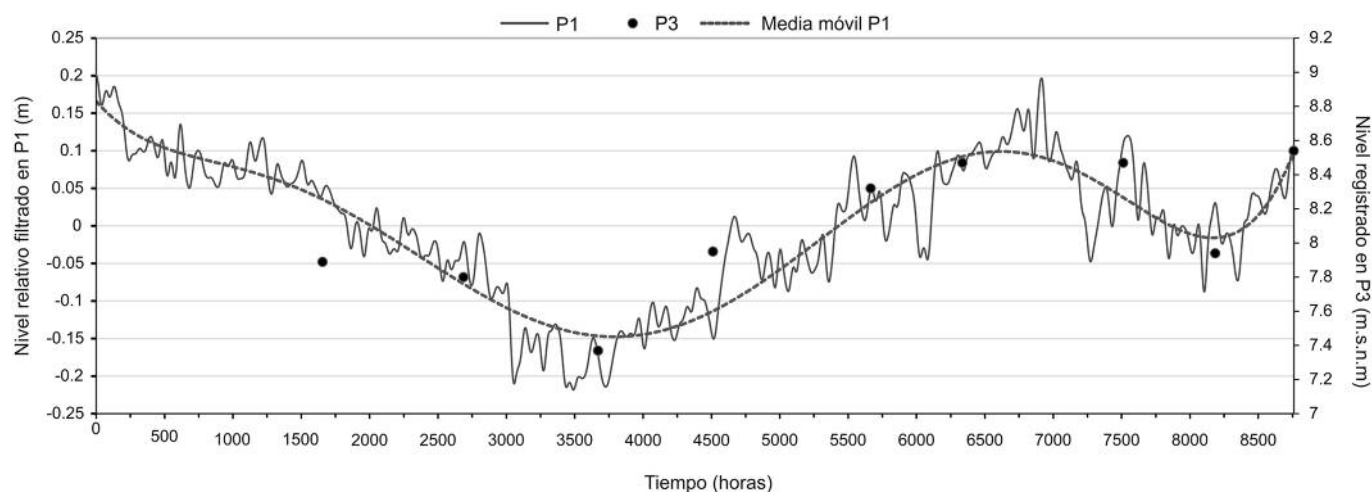


Fig. 4.- Comparación del nivel piezométrico filtrado en P1 con los niveles medidos en otro punto no perturbado por la marea.

Fig. 4.- Comparison of filtered groundwater head in P1 with measured heads in other point undisturbed by the tide.

por la marea (P3). El resultado muestra un ajuste importante, teniendo en cuenta que P3 es un punto diferente con cambios propios en el nivel. No obstante, la tendencia general de las oscilaciones no debidas a marea en el nivel ha sido respetada. Esta validación se espera realizarla más detalladamente en un futuro con nuevos puntos de muestreo.

Las oscilaciones no mareales que permanecen en el registro piezométrico tras su filtrado muestran, de forma general, una tendencia semejante a la registrada en puntos situados en la zona de recarga del acuífero, principalmente en relación a la presencia del río Guadalfeo. No obstante, estas oscilaciones remanentes y sus causas son objeto de estudio actualmente.

## Conclusiones

Los registros de marea y de nivel piezométrico han sido diferenciados mediante herramientas de procesado de señales ondulatorias. Esto ha permitido distinguir la

afección de la marea en dos piezómetros cercanos al borde costero mediante el filtrado de sus señales piezométricas. Los cambios observados a diferentes profundidades confirman la mayor afección de la marea a mayores profundidades dentro de un mismo acuífero libre costero. El tratamiento de dos intervalos temporales diferentes demuestra que el método de filtrado es preciso en relación al volumen de datos utilizado y los filtros de paso aplicados. Los resultados finalmente permiten cuantificar y eliminar las oscilaciones mareales del registro de nivel piezométrico, lo cual facilitará un mejor conocimiento de los procesos que tienen lugar hacia el interior del acuífero, además de los cambios en la zona de descarga y sus afecciones sobre la configuración de la cuña salina.

## Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias a los fondos del CGL2012-32892 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y del

grupo de investigación de la Junta de Andalucía RNM-369. Gracias también al organismo de Puertos del Estado del Ministerio de Fomento por haber proporcionado los datos de mareas.

## Referencias

- Bye, J.A.T. y Narayan, K.A. (2009). *Coastal and Shelf Science* 84, 219-226.
- Cirpka, O.A. y Attinger, S. (2003). *Water Resources Research* 39(9), 1257.
- Erskine, A.D. (1991). *Ground Water* 29, 556-562.
- Guarracino, L., Carrera, J. y Vázquez-Suñé, E. (2012). *Journal of Hydrology* 450-451, 150-158.
- Li, H. y Jiao, J.J. (2003). *Advances in Water Resources* 26, 9-16.
- Nielsen, P. (1990). *Water Resources Research* 26, 2127-2134.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. y Lentz, S. (2002). *Computers and Geosciences* 28, 929-937.
- Trefry, M.G. y Johnston, C.D. (1998). *Ground Water* 36, 427-433.
- Zhou, P., Li, G., Lu, Y. y Li, M. (2013). *Hydrogeology Journal* 22, 383-396.