

# Acuíferos con flujo de densidad variable como análogos a los movimientos isostáticos litosféricos

*Aquifers with variable density flow as lithospheric isostatic movement analogues*

Fernando Sola, Alba Muñoz y Ángela Vallejos

Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Dpto. Biología y Geología. Universidad de Almería. Carretera Sacramento s/n, 04120, Almería. [fesola@ual.es](mailto:fesola@ual.es); [alba97mg@gmail.com](mailto:alba97mg@gmail.com); [avallejo@ual.es](mailto:avallejo@ual.es)

## ABSTRACT

The extraction of groundwater in a variable density aquifer causes instability in the distribution of its hydrostatic load. When freshwater is extracted, this imbalance tends to compensate with the rise of saltwater "upconing". On the other hand, when saltwater is extracted, there is an increase in salinity under the extraction well, a notable decrease in the vicinity of the well and a slight rise at a certain distance. All these variations in the density of groundwater, as a consequence of pumping, resemble the arrangement of lithospheric masses in regions with isostatic imbalances. This aquifer-lithosphere analogy can be used to recreate the evolution of a certain region through a strategic distribution of the pumping wells.

**Key-words:** analogue model, variable density model, interface.

## RESUMEN

La extracción de agua subterránea en un acuífero de densidad variable provoca desequilibrios en la distribución de su carga hidrostática. Cuando se extrae agua dulce, este desequilibrio tiende a compensarse con el ascenso de agua salada "upconing". Por otra parte, cuando lo que se extrae es agua salada, se produce un aumento en la salinidad bajo el pozo de extracción, un notable descenso en las inmediaciones de este y un ligero ascenso a cierta distancia. Todas estas variaciones en la densidad del agua subterránea, como consecuencia del bombeo, se asemejan a la disposición de las masas litosféricas en regiones con desequilibrios isostáticos. Esta analogía acuífero-litosfera puede ser utilizada para recrear la evolución de una determinada región mediante una distribución estratégica de los sondeos de extracción.

**Palabras clave:** modelos análogos, acuífero de densidad variable, interfase.

*Geogaceta*, 67 (2020), 83-86  
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

En general, los acuíferos de densidad variable se caracterizan por la estratificación de sus aguas subterráneas en función de la salinidad. Las aguas más someras son más dulces y, por lo tanto, menos densas que las aguas profundas. Así, el sistema acuífero tiende a adoptar un equilibrio dinámico según el peso de sus aguas. Este equilibrio de pesos puede verse modificado como consecuencia de una perturbación, como por ejemplo el bombeo de agua subterránea.

Algo similar ocurre en la litosfera terrestre. Aquí los materiales corticales y del manto superior están también estratificados por densidad y, al igual que ocurre con los acuíferos, se producen perturbaciones en la distribución de materiales como consecuencia de los movimientos convectivos en el manto terrestre, condicionados por la temperatura, y que son el motor de la tectónica de placas. Existen dos contextos litosféricos básicos en los que se reconocen estas perturbaciones: contextos de adelgazamiento cortical (rifts) y contextos de engrosamiento cortical (orógenos).

El adelgazamiento cortical en las zonas de rift provoca el ascenso de material mantélico más denso para equilibrar los pesos litostáticos. Por su parte, el engrosamiento cortical se produce cuando dos placas tectónicas colisionan generando un orógeno. En la vertical de este orógeno la carga litostática se incrementa provocando una flexura cortical en sus inmediaciones (cuenca *foredeep*) y un abombamiento a cierta distancia del orógeno (*forebulge*).

En este trabajo se analizan las observaciones de la distribución de densidades que se produce cuando se provoca, a través del bombeo, una variación del peso en un determinado sector en un acuífero de densidad variable, para ver su analogía con el sistema litosférico.

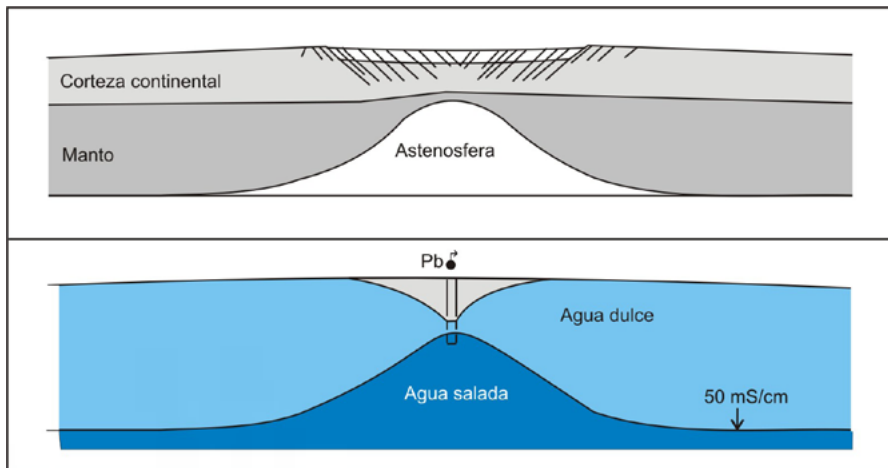
## Contextos de extensión litosférica

En aquellos puntos de la litosfera terrestre en los que se produce una importante extensión cortical, el déficit de peso que esto conlleva tiende a ser compensado con el ascenso de un domo de material mantélico más denso. Algo si-

milar ocurre en los acuíferos de densidad variable cuando se extrae agua dulce por bombeo (Fig. 1). La extracción de agua dulce en este tipo de acuífero provoca el ascenso de un conoide de agua más salina que tiende a compensar el déficit de peso en la vertical del sondeo. A este proceso se le conoce como *upconing*. Este fenómeno fue ya descrito a principios del siglo XX (Pennink, 1905; Houben y Post, 2017) y lleva aparejado la salinización y consecuente abandono de sondeos, habiéndose convertido en un grave problema ambiental en muchas regiones (Paster y Dagan, 2008; Werner *et al.*, 2013; Jakovovic *et al.*, 2016). A pesar de lo ampliamente estudiado del fenómeno, se conoce poco de cómo evoluciona el domo salino lateralmente. Para ello harían falta piezómetros a cierta distancia del pozo de extracción de agua dulce.

## Contextos de engrosamiento litosférico

Las zonas orogénicas se caracterizan por un engrosamiento de la litosfera, fruto del plegamiento y superposición



**Fig. 1.- Analogía entre el ascenso de un domo mantélico en una zona de rift y el upconing producido por la extracción de agua dulce en un acuífero de densidad variable. Ver figura en color en la web.**

*Fig. 1.- Analogy between the rise of a mantle dome in a rift zone regarding the upconing produced by the extraction of fresh water in a variable density aquifer. See color figure in the web.*

de materiales corticales. Como consecuencia de esto, el peso de la litosfera en esa región es mayor que en las áreas circundantes. Con objeto de recrear este efecto de incremento del peso de la litosfera, se han utilizado datos de conductividad eléctrica (CE) medidos en piezómetros situados en el entorno de la planta desaladora de Almería. La conductividad eléctrica de un fluido es proporcional al contenido salino y, por tanto, a la densidad de este.

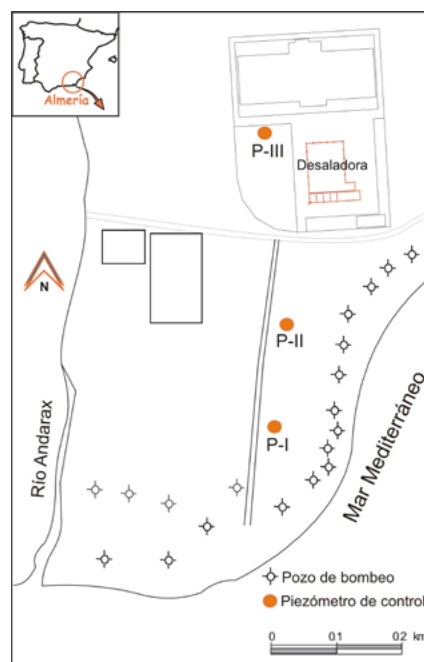
La desaladora de Almería se abastece de agua de mar a través de 19 sondeos situados entre 50 y 100 m de la línea de costa que captan la cuña de agua marina que penetra en el acuífero. Este es un acuífero costero constituido por gravas, arenas y limos con un espesor medio de 100 m. Tres piezómetros que cortan todo el tramo acuífero (P-I, P-II y P-III), situados a 200, 500 y 1000 m de la línea de costa respectivamente, han sido usados para monitorizar los cambios provocados por las extracciones de los pozos de bombeo en el acuífero (Fig. 2).

El régimen de bombeo por parte de la planta desaladora consiste en bombear durante la noche, cuando los costes eléctricos son menores, y parar durante el día, si bien hay algunas noches en que no se bombea. El caudal medio de bombeo es de 4000 m<sup>3</sup>/hora.

Antes de que la planta desaladora comenzase a funcionar en el año 2007, el acuífero se comportaba como cualquier acuífero costero, en el que el agua de mar, como consecuencia de la carga hidrostática, penetraba en el acuífero detrítico situándose en forma de cuña

por debajo del agua dulce. La ecuación que gobierna la geometría de la cuña es la de Ghyben-Herzberg (Herzberg, 1901). Según esta ecuación, la interfase se adentrará en el acuífero desde la línea de costa hacia cotas cada vez más negativas, como consecuencia del incremento del espesor de la franja de agua dulce que se dispone sobre ella. De esta forma, la sumatoria de los pesos de columna de agua en distintos puntos del perfil acuífero debería ser constante.

Una vez comenzaron los bombeos de agua de mar el sistema perdió el equili-



**Fig. 2.- Localización de los sondeos de bombeo y enjambres de piezómetros en el área de estudio.**

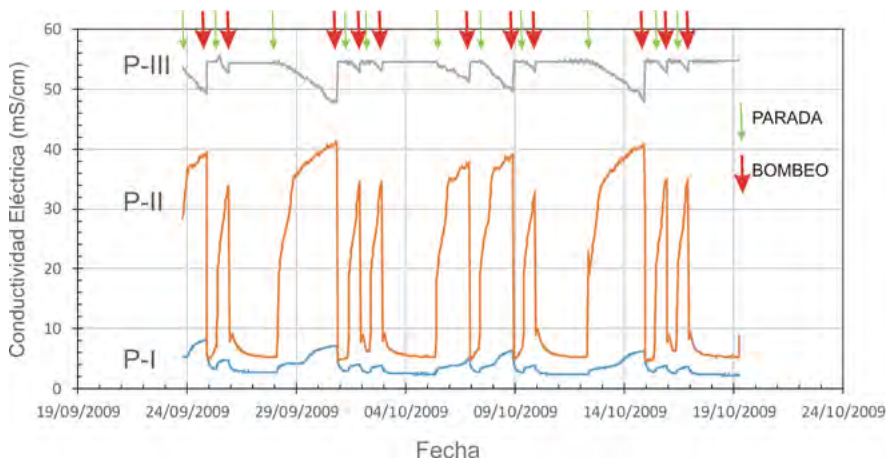
*Fig. 2.- Location of the pumping boreholes and cluster of piezometers in the study area.*

brio natural, y el agua de mar ocupó la franja acuífera desde la línea de costa hasta la batería de bombeos, produciéndose tras esta batería hacia tierra adentro una disminución drástica en la salinidad. Todas estas variaciones han podido ser registradas a partir de testificaciones periódicas en los piezómetros. Esta disminución de salinidad tiende a atenuarse tierra adentro, de modo que es muy notable en P-I y P-II, y poco evidente en P-III (Jorroto *et al.*, 2017).

Sin embargo, a partir de registros obtenidos en continuo se puede observar el comportamiento antagónico que tiene la CE en los piezómetros P-I y P-II frente a P-III durante los ciclos diarios de bombeo-parada de la planta (Fig. 3). En los momentos en los que la planta desaladora está bombeando agua salada del acuífero, los piezómetros I y II sufren un descenso en la salinidad, con oscilaciones de hasta 40 mS/cm en P-II. Mientras, P-III muestra un ligero incremento de hasta 6 mS/cm durante esos periodos. Una vez los bombeos cesan, todos los piezómetros tienden a adoptar la salinidad previa al bombeo, produciéndose ascensos de salinidad en P-I y II, y descensos en P-III (Fig. 3).

Las zonas orogénicas, caracterizadas por un mayor peso litostático, son simuladas en este trabajo por la zona de alta salinidad generada entre la batería de sondeos y la línea de costa (Fig. 4). Por delante del frente del orógeno se forma la conocida como cuenca *foredeep*. Ejemplos en la Península Ibérica de estas cuencas lo serían la Cuenca del Guadalquivir en la Cordillera Bética, o la Cuenca del Ebro en los Pirineos (García-Castellanos *et al.*, 2002; Marín-Lechado *et al.*, 2017; Curry *et al.*, 2019). Estas cuencas *foredeep* estarían representadas en nuestro análogo por la notable reducción en salinidad que se produce tras la batería de sondeos. Finalmente, a cierta distancia del orógeno se genera un abombamiento litosférico conocido como *forebulge*. Este abombamiento se correspondería con las elevaciones de Sierra Morena en el ejemplo de la Cordillera Bética.

Todos estos elementos propios de un cinturón orogénico están presentes en el análogo estudiado (Fig. 4). Además, los ciclos bombeo y parada por parte de la planta desaladora modifican la morfología de la interfase, permitiendo con esto estudiar la evolución que sufriría cada uno de los componentes del cinturón orogénico desde su formación hasta su



**Fig. 3.- Evolución de la conductividad eléctrica en los piezómetros de control resultante de los ciclos de bombeo-parada por parte de la planta desaladora de Almería. Ver figura en color en la web.**

*Fig. 3.- Evolution of the electrical conductivity in the piezometers of control resulting from the pumping-stop cycles by the Almería desalination plant. See color figure in the web.*

total erosión. Esta evolución, que llevaría decenas de millones de años, puede ser simulada en tan solo 24 horas con el análogo hidrogeológico.

La figura 5 muestra la evolución hipotética que sufriría una cuenca *foredeep* y su *forebulge* adosado, a lo largo de un ciclo de orogenia-erosión del orógeno. La altura y posición del *forebulge* y la profundidad del *foredeep* dependerán de la carga litostática del orógeno. Esta misma relación es la que se observa en los registros de CE cuando se comparan los valores de salinidad entre los piezómetros P-I y II (situados en el equivalente al *foredeep*) con los de P-III (situado en el equivalente al *forebulge*) (Fig. 3).

### Discusión

La utilización de modelos análogos para reconstruir escenarios tectónicos ha sido una técnica muy utilizada en las últimas décadas (Burg *et al.*, 1994; Crespo-Blanc *et al.*, 2018). Los acuíferos de densidad variable pueden ser utilizados como un análogo natural a mesoescala de sistemas fluidos estratificados por densidad, como lo puede ser la litosfera terrestre.

La perturbación del equilibrio natural de pesos en el sistema acuífero estratificado por densidad puede generar pérdidas (mediante el bombeo de agua dulce) o incrementos (mediante el bombeo de agua salada) de carga en las inmediaciones de la zona de bombeo. En un contexto de extracción de agua dulce y generación de *upconing* bajo el pozo de bombeo, se han observado zonas deprimidas (*downconing*) en la geometría de la interfase (Bakker y Schaars, 2018).

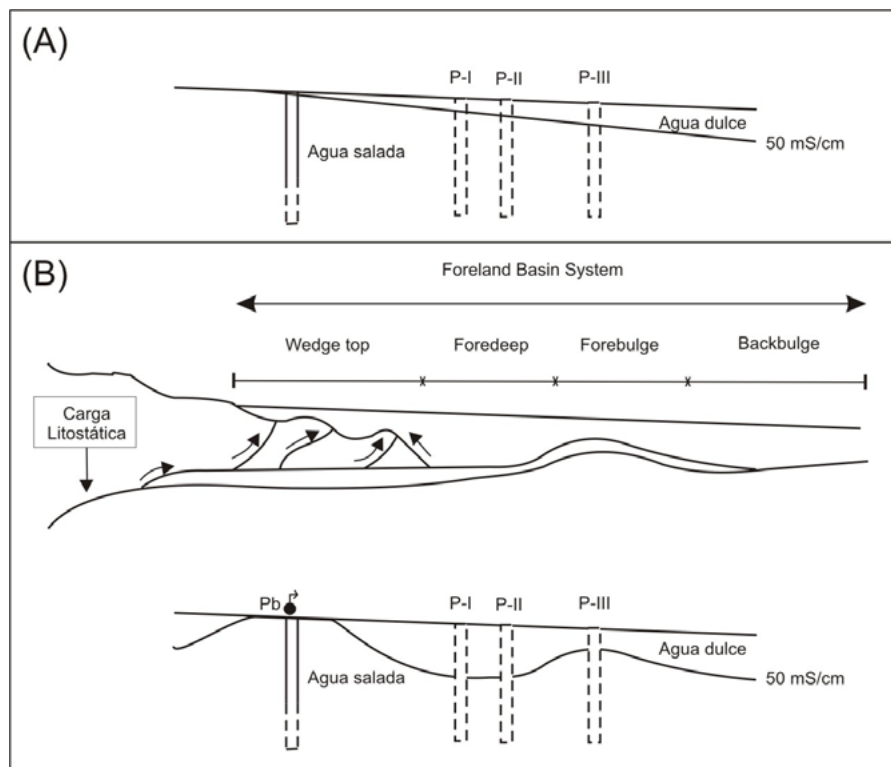
Las analogías entre el sistema litosférico y un medio hidrogeológico salino se basan únicamente en la estratificación por densidad de sus fluidos. Sin embargo, existen grandes diferencias debido a una variabilidad elevada en parámetros como el contraste de densidades o la viscosidad de sus fluidos. Por lo tanto, no sería posible extrapolar toda la informa-

ción extraída del sistema hidrogeológico, tal como la ratio entre el ascenso del *forebulge* y la depresión en el *foredeep*.

### Conclusiones

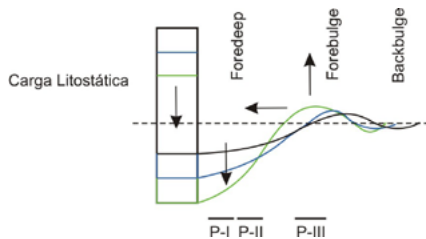
La extracción de agua salina en un acuífero de densidad variable genera una descompensación isostática en esa parte del acuífero, que da lugar a variaciones en las salinidades de su entorno. De acuerdo con esta distribución de salinidad se reconocen tres zonas que se corresponderían con el orógeno, la cuenca *foredeep* y el *forebulge*, en el análogo litosférico.

Por su parte, cuando lo que se extrae es agua dulce superficial la configuración que se obtiene es similar a contextos de *rifting*, donde bajo la perturbación asciendo un material más denso en forma de domo. A diferencia de lo que ocurre en las zonas orogénicas, en los entornos de rift no se han discretizado estructuras anexas generadas como consecuencia de dicha perturbación litosférica. Medidas de CE a lo largo de un perfil perpendicular al *upconing* podrían arrojar información de qué ocurre con la distribución de masas en estos contextos.



**Fig. 4.- A) Sección correspondiente al estado de equilibrio del acuífero estudiado. B) Analogía entre las deformaciones en la litosfera en un cinturón orogénico (modificado de DeCelles y Giles, 1996) con las variaciones de salinidad observadas en un acuífero de densidad variable cuando se extrae agua salada (Pb: pozo de bombeo).**

*Fig. 4.- A) Cross-section corresponding to steady state of the studied aquifer. B) Analogy between the lithospheric deformations in an orogenic belt (modified from DeCelles and Giles, 1996) with the variations of salinity observed in a variable density aquifer when saltwater is extracted (Pb: pumping well).*



**Fig. 5.- Evolución de una cuenca foredeep y del forebulge en función de la carga litostática (modificado de Catuneanu, 2004). Ver figura en color en la web.**

Fig. 5.- Evolution of a foredeep basin and forebulge based on the lithostatic load (modified from Catuneanu, 2004). See color figure in the web.

Estos análogos hidrogeológicos a mesoescala pueden ser de gran utilidad para conocer la evolución de los sistemas litosféricos, teniendo además la ventaja de poder ser diseñados según la conveniencia de la estructura a modelar. Así, se puede plantear una configuración de sondeos de extracción concreta para que recreen las condiciones más similares a la estructura que nos interese.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente llevada a cabo en el marco de Cei-MAR y Ceia3 y del proyecto CGL2015-67273-R financiado por MINECO- FEDER. Agradecemos a los revisores anónimos, cuyos comentarios han contribuido a mejorar el manuscrito original.

## Referencias

- Bakker, M. y Schaars, F. (2018). En: *25th Salt Water Intrusion Meeting*. Gdansk. Abstract book 20.
- Burg, J.P, Davy, P. y Martinod, J. (1994). *Tectonics* 13(2), 475-483.
- Catuneanu, O. (2004). *Journal of African Earth Sciences* 38, 225-242.
- Crespo-Blanc, A., Jiménez-Bonilla, A., Balanyá, J.C., Expósito, I. y Díaz-Azpiroz, M. (2018). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 31, 111-122.
- Curry, M.E., van der Beek, P., Huismans, R.S., Wolf, S.G. y Muñoz, J.A. (2019). *Earth and Planetary Science Letters* 515, 26-37.

- DeCelles, G. y Giles, K.N. (1996) *Basin Research* 8, 105-123.
- García-Castellanos, D., Fernández, M. y Torne, M. (2002). *Tectonics* 21, 1-17.
- Herzberg, A. (1901). *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung* 44, 815-819.
- Houben, G. y Post, V.E. (2017). *Hydrogeology Journal* 25, 243-247.
- Jakovovic, D., Werner, A.D., de Louw, P.G., Post, V.E. y Morgan, L.K. (2016). *Advances in Water Resources* 94, 75-86.
- Jorroto, S., Sola, F., Vallejos, A., Sánchez-Martos, F., Gisbert, J., Molina, L., Rigol, J.P. y Pulido-Bosch, A. (2017). *Geogaceta* 62, 87-90.
- Marín-Lechado, C., Pedrera, A., Peláez, J.A., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A. y Henares, J. (2017). *Tectonics* 36, 1072-1089.
- Paster, A. y Dagan, G. (2008). *Water Resources Research* 44, W05408.
- Pennink, J.M. (1905). *Transactions of the American Society of Civil Engineers* LIV, 169-181.
- Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E., Vandenberghe, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. y Barry, D.A. (2013). *Advances in Water Resources* 51, 3-26.