

Las barreras hidrodinámicas negativas: un sistema efectivo para reducir la descarga de agua dulce al mar

Negative hydrodynamic barriers: an effective system to reduce the freshwater discharge into the sea

Fernando Sola¹ y Ángela Vallejos¹

¹ Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Dpto. Biología y Geología. Universidad de Almería. Carretera Sacramento s/n, 04120, Almería.

fesola@ual.es; avallejo@ual.es

*Corresponding author

ABSTRACT

The growing demand for water is a widespread problem, especially in arid and semi-arid areas. Coastal areas are particularly sensitive to this problem, although in these areas there is the paradox that coastal aquifers naturally drain large volumes of freshwater into the sea through submarine discharge. In this work we propose, for the first time, the use of negative hydrodynamic barriers as an effective system to reduce the volume of these discharges. For this purpose, the aquifer of the Andarax river delta has been studied, where the presence of a set of boreholes that capture the saline water wedge penetrating the aquifer. This would be acting as a hydrodynamic barrier, which on the one hand prevents the advance of the saline wedge to the continent, and on the other hand, the outflow of freshwater to the sea. The problem with this type of barrier is the economic cost linked to the energy consumption required to continuously pump saline water, so its use would only be appropriate where there is a desalination plant that is supplied with saline water from the wedge that penetrates the aquifer.

Key-words: Coastal aquifer, marine intrusion, water resources, Andarax delta.

RESUMEN

La necesidad de recursos hídricos para satisfacer las crecientes demandas es un problema generalizado, especialmente acuciante en las zonas áridas y semiáridas. Las zonas costeras son especialmente sensibles a este problema, si bien, en estas áreas se da la paradoja de que los acuíferos costeros, de forma natural, drenan grandes volúmenes de agua dulce al mar a través de la descarga submarina. En este trabajo se plantea, por primera vez, la utilización de barreras hidrodinámicas negativas como un sistema efectivo para reducir el volumen de estas descargas. Para ello, se ha estudiado el acuífero del delta del río Andarax, donde la presencia de una batería de sondeos que captan la cuña de agua salina que penetra en el acuífero, estaría actuando como una barrera hidrodinámica, que por un lado evita el avance de la cuña salina al continente, y por otro, la salida de agua dulce al mar. El problema que suscita este tipo de barreras es el coste económico ligado al consumo energético necesario para bombear continuamente agua salina, por lo que su uso sólo sería conveniente allí donde exista una planta desaladora que se abastezca de agua salina de la cuña que penetra en el acuífero.

Palabras clave: Acuífero costero, intrusión marina, recursos hídricos, delta Andarax.

Geogaceta, 74 (2023), 71-74

<https://doi.org/10.55407/geogaceta98162>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 30/01/2023

Fecha de revisión: 20/04/2023

Fecha de aceptación: 26/05/2023

Introducción

Las zonas costeras son áreas densamente pobladas donde existe generalmente un importante desarrollo agrícola, lo que supone la necesidad de recursos hídricos para satisfacer esas demandas. En zonas semiáridas, como pueden ser las costas de la cuenca mediterránea, gran parte de las necesidades se cubren con agua subterránea, pero dado que frecuentemente las demandas anuales superan el volumen de agua infiltrada, los acuíferos costeros sufren explotación intensiva, con el consiguiente riesgo de intrusión marina que esto conlleva.

Distintas soluciones se han planteado para evitar la intrusión marina, entre ellas la recarga artificial con aguas regeneradas o la utilización de recursos de agua

no convencionales como puede ser la desalación. Una solución pobremente desarrollada sería evitar la descarga natural de agua dulce al mar. Esta descarga es un proceso natural en el que flujo subterráneo acaba saliendo en forma de descarga difusa o puntual en el lecho marino, perdiéndose de esta forma este valioso recurso. Esta descarga se podría evitar construyendo una barrera impermeable entre el acuífero y el mar que impidiese su salida. Sin embargo, este tipo de infraestructura sería muy cara y poco viable. Estas barreras también se han planteado con el objetivo contrario, es decir, evitar que el agua de mar entre en el acuífero salinizándolo (Custodio y Llamas, 1976; Wu *et al.*, 2020; Armanuos *et al.*, 2020). Existen otro tipo de barreras, las barreras hidrodinámicas (Ebeling *et*

al., 2019), que tendrían los mismos resultados, especialmente las barreras hidrodinámicas negativas.

Este tipo de barreras, ya citadas en Custodio y Llamas (1976), consiste en la construcción de una batería de sondeos que extraen agua salina de la cuña de agua de mar que penetra en el acuífero, formando así un freno a la entrada de esta cuña tierra adentro. Este tipo de solución ha sido testada tanto en estudios de simulación numérica (Pool y Carrera, 2009; Stein *et al.*, 2019) como en casos reales (Stein *et al.*, 2020), pero siempre se ha planteado como un medio para impedir la entrada de agua salina al acuífero, previniendo así la intrusión marina, y no como una forma de reducir la salida de agua dulce al mar, evitando así la pérdida de este recurso.

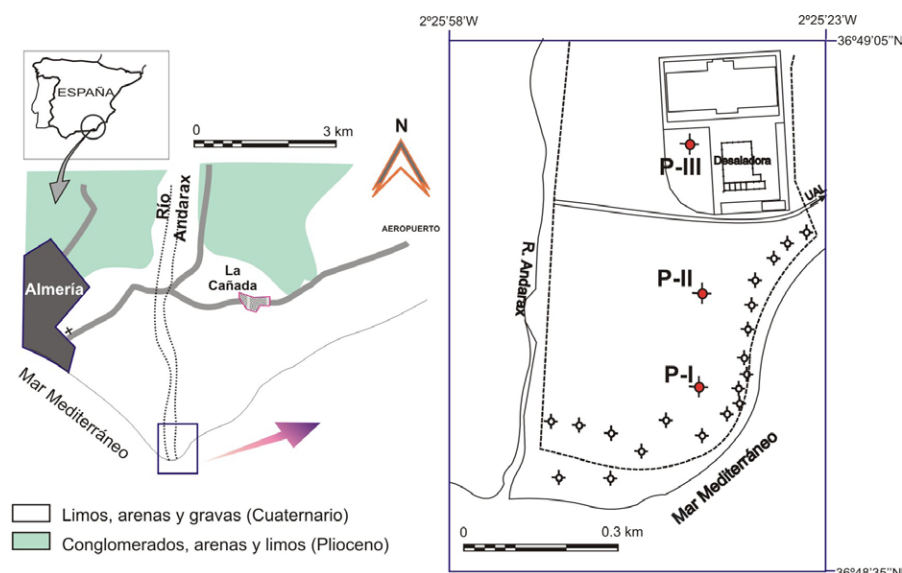


Fig. 1.- Esquema hidrogeológico simplificado del delta del río Andarax (Almería) y localización de los sondeos de abastecimiento a la planta desaladora de Almería. P-I, P-II y P-III: piezómetros de control. Ver figura en color en versión web.

Fig. 1.- Simplified hydrogeological sketch of the Andarax river delta (Almería) and location of the supply boreholes to the Almería desalination plant. P-I, P-II and P-III: control piezometers. See color figure on web.

En este trabajo se estudia el uso de las barreras hidrodinámicas negativas como solución a la salida de agua dulce al mar. Para ello, se analizan los datos registrados en el entorno de la Planta Desaladora de Almería. Esta desaladora se abastece de agua salina a través de una batería de sondeos que captan la cuña salina que penetra en el acuífero del delta del río Andarax.

Contexto geológico

El delta del río Andarax conforma un acuífero multicapa detrítico costero compuesto por sedimentos fluvio-deltaicos de edad Plio-cuaternario. La potencia de este acuífero es de unos 100 m con una base impermeable constituida por limos y margas del Plioceno inferior. En el año 2007 se instaló una planta desaladora con objeto de abastecer de agua a la ciudad de Almería. Esta planta se abastece de agua salada a través de 16 sondeos costeros, los cuales tienen su tramo ranurado en la parte media-baja del acuífero con objeto de captar solamente el agua salada de la cuña de agua marina que penetra en el acuífero.

El régimen de explotación que tiene la planta es variable, según las necesidades, pero en general se extrae un volumen de unos 4000 m³/h durante unas 12 horas al día, a excepción de los fines de semana en que los pueden bombear las 24 horas. Como consecuencia de estas

extracciones, la cuña de agua marina que de manera natural antes de la puesta en funcionamiento de la planta desaladora, se extendía varios kilómetros tierra adentro, ha reducido significativamente su espesor, lo cual se ha vinculado al efecto de barrera hidráulica negativa que esta batería de extracción ha tenido en el acuífero (Stein *et al.*, 2020).

Materiales y Métodos

Para estudiar el efecto de los bombeos de la planta desaladora sobre el acuífero del delta del río Andarax, se han controlado los caudales de extracción por parte de la planta y se han comparado con registros de conductividad eléctrica, temperatura y nivel piezométrico medidos en tres piezómetros completamente ranurados ubicados aguas arriba de la batería de extracción. Estos tres piezómetros (P-I, P-II y P-III) se sitúan a una distancia de 200, 500 y 1000 m de la costa, respectivamente (figura 1).

Los datos de conductividad eléctrica y temperatura se han registrado mensualmente haciendo una testificación en profundidad mediante una sonda Solinst con medidas cada 2 m. Además, para tener un registro en continuo de estos valores, puntualmente se han instalado CTD-divers en los piezómetros a profundidades de interés para interpretar el proceso.

Resultados

Los perfiles de conductividad eléctrica (CE), realizados en los tres piezómetros situados aguas arriba de la batería de extracción, nos dan una idea bastante fidedigna de cómo es la distribución de salinidades en esta área (figura 2). El más alejado de ellos (P-III) es el que sufre menores variaciones durante los ciclos de bombeo-parada de la planta desaladora. En P-II sí se observa que en los momentos en que la planta está extrayendo agua salina, la posición de la interfase tiende a descender frente a los momentos de parada, pasando la interfase de estar situada a una cota de unos -40 m s.n.m., a cotas de -72 m s.n.m. aproximadamente. El piezómetro P-I presenta más variabilidad entre los perfiles en bombeo y en reposo, mostrando un pico de conductividad eléctrica entre las cotas -10 y -20 m s.n.m. con valores próximos al agua de mar y un descenso drástico de salinidad hasta la base del piezómetro. El incremento de salinidad detectado entre las cotas -10 y -20 m s.n.m. se atenúa claramente cuando cesa el bombeo. El corto periodo de tiempo entre los ciclos bombeo-parada no permiten al sistema acuífero alcanzar la estabilización. De ahí que en los momentos de parada puedan llegar a medirse valores de conductividad eléctrica más altos en los piezómetros interiores que en P-I.

Con objeto de observar cómo evoluciona este pico de salinidad del tramo superior del piezómetro P-I con ciclos de bombeo-parada de la extracción, se colocó un CTD-diver a una profundidad de 13 m (figura 3), que es donde se sitúa el máximo de este pico de salinidad. Los resultados muestran que en los momentos en que la planta desaladora está extrayendo agua salina, lo cual se evidencia por los descensos de hasta 2 m en el nivel piezométrico, la conductividad eléctrica a esta profundidad se incrementa hasta valores de 48.000 µS/cm, mientras que en los momentos de parada la conductividad eléctrica desciende hasta los 28.000 µS/cm. Por su parte, los registros mediante CTD-diver obtenidos a una profundidad de 30 m en el piezómetro P-II (figura 3), muestran que durante los momentos de bombeo la conductividad eléctrica disminuye hasta los 4.000 µS/cm, incrementándose hasta alcanzar los 17.000 µS/cm en los momentos de parada.

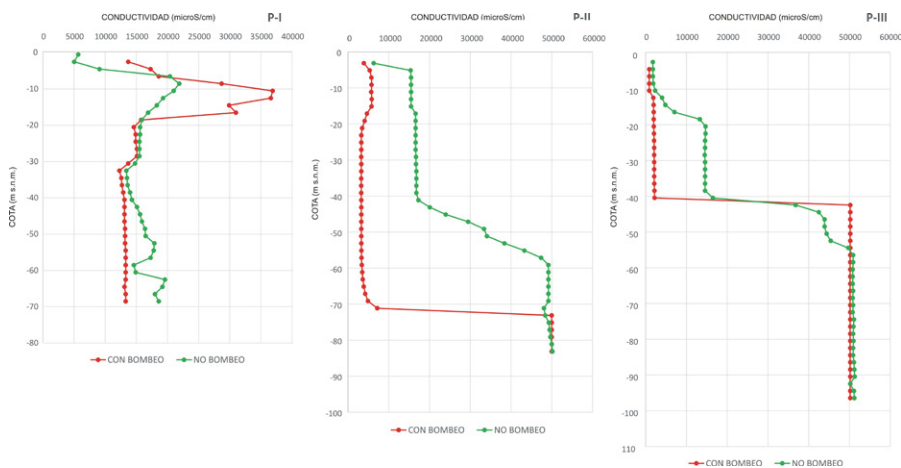


Fig. 2.- Perfiles de conductividad eléctrica a lo largo de los piezómetros P-I, P-II y P-III, en momentos de bombeo (rojo) y parada de extracciones de la planta desaladora (verde). Ver figura en color en versión web.

Fig. 2.- Electrical conductivity profiles along the piezometers P-I, P-II and P-III corresponding to pumping (red line) and stopping in desalination plant water extractions (green line). See color figure on web.

Discusión

El acuífero del delta del río Andarax es un acuífero multicapa compuesto por conglomerados, arenas y limos. Los tramos de granulometría más fina pueden llegar a individualizar tramos acuíferos más o menos desconectados. Esto es lo que ocurre en la parte superior del piezómetro P-I, donde un nivel de limos separa un tramo acuífero superior de otro inferior. Como consecuencia de esto, este tramo superior está intruido por una cuña de agua marina diferenciada, que es la causante de que se midan valores de conductividad próximos al agua de mar en la parte alta del piezómetro P-I. La extensión lateral de este tramo de limos debe de ser limitada, lo cual es esperable en un medio deltaico, de modo que en los piezómetros P-II y P-III no se puede hablar de la presencia de dos tramos acuíferos.

El avance o retroceso de la cuña superior de agua de mar está fuertemente controlado por los ciclos de bombeo-parada por parte de la planta desaladora (figura 4). Así, en los momentos en que se bombea agua salina de la parte baja del acuífero la cuña superior tiende a avanzar tierra adentro, mientras que en los momentos de parada se retrae hacia el mar. Esta oscilación cíclica de la cuña de agua de mar superior es inversa a la que se observa en la cuña inferior. Esta última, en los momentos de bombeo, tiende a retroceder hacia el mar como consecuencia de la formación de una barrera hidrodinámica bajo la batería de

pozos de extracción. Una vez cesan los bombeos y la barrera desaparece, la cuña de agua de mar tiende a avanzar hacia tierra adentro.

El retroceso hacia el mar que sufre la

cuña superior de agua marina en los momentos de cese de las extracciones estaría ligado al empuje que el flujo de agua dulce ejerce sobre ésta. Este empuje cesa en los momentos de bombeo, lo cual indicaría que en estos momentos no existiría una descarga de agua dulce al mar, es decir, que la barrera hidrodinámica negativa que generan los bombeos estaría actuando como barrera a la descarga de agua dulce del acuífero en el mar. Este efecto de barrera frente a la descarga de agua dulce al mar generado por la batería de pozos de extracción hubiese sido más difícil de reconocer de no existir esta cuña superior en la parte alta del piezómetro P-I.

La utilización de las barreras hidráulicas negativas como medio para evitar la pérdida de agua dulce al mar solo estaría justificada en lugares donde se extrae agua salina para abastecer a una planta desaladora, ya que requiere de un continuo bombeo de agua salada, con el consiguiente coste energético que esto supone.

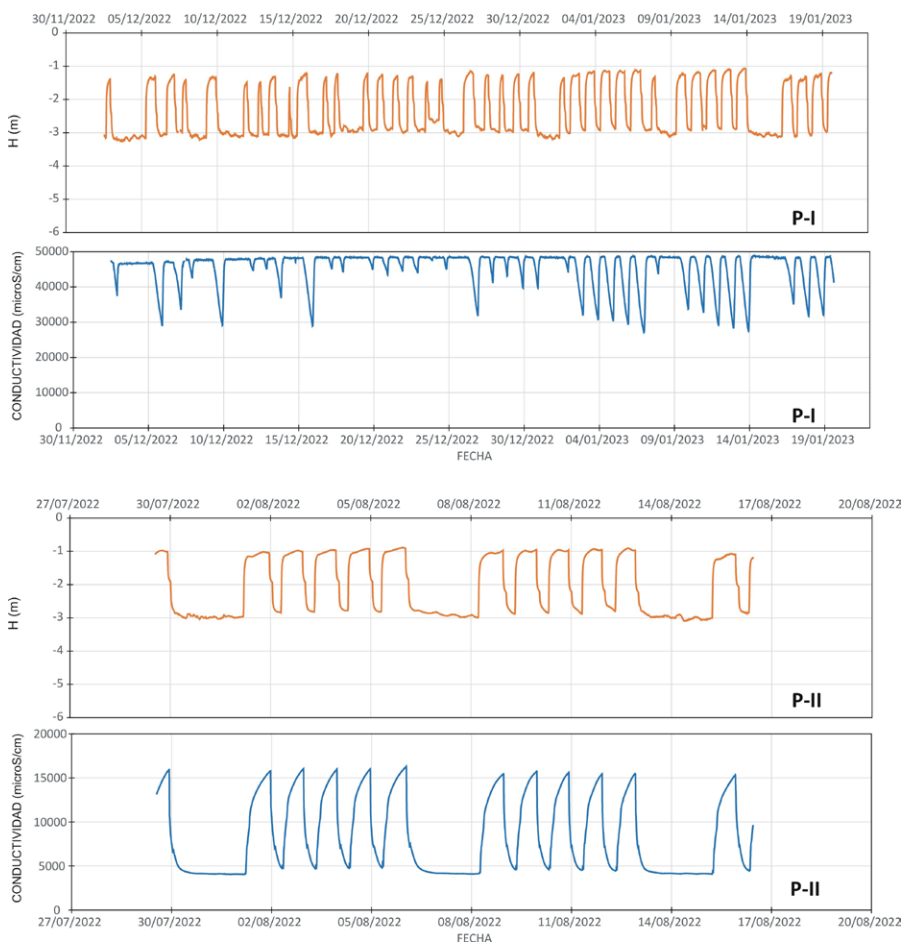


Fig. 3.- Registro de nivel piezométrico (m s.n.m.) y conductividad eléctrica (µS/cm) realizados en el piezómetro P-I a una profundidad de 13 m y en el piezómetro P-II a una profundidad de 30 m. Ver figura en color en versión web.

Fig. 3.- Piezometric level (m a.s.l.) and electrical conductivity (µS/cm) registers in the P-I piezometer at 13 m depth and in the P-II piezometer at 30 m depth. See color figure on web.

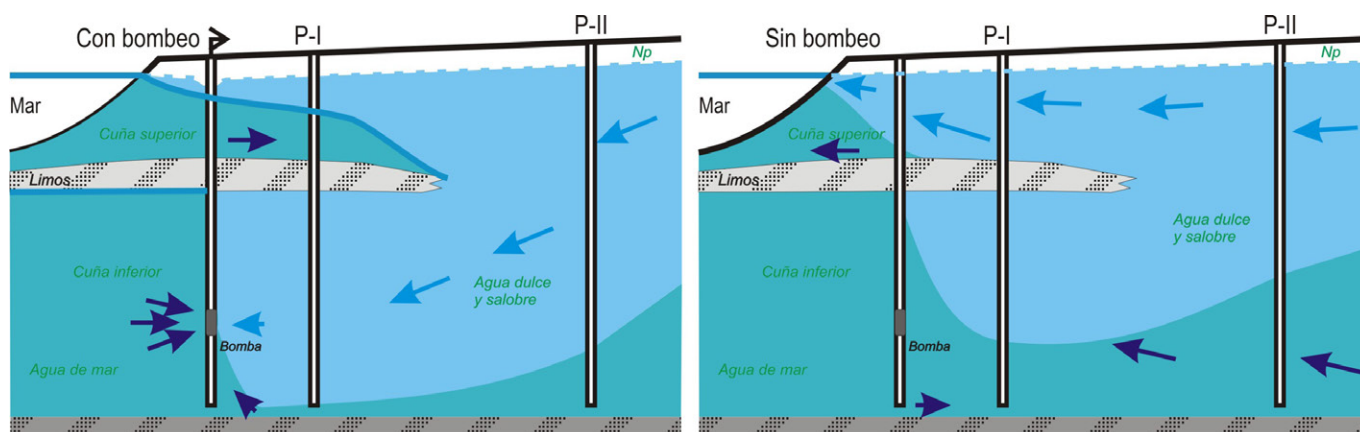


Fig. 4.- Esquema hidrodinámico del efecto de los ciclos de bombeo-parada de las extracciones de agua salina para abastecimiento a la planta desaladora sobre el acuífero del delta del Andarax. Ver figura en color en versión web.

Fig. 4.- Hydrodynamic scheme of the effect of the pumping-stopping cycles of saline water extractions for supplying the desalination plant on the Andarax delta aquifer. See color figure on web.

Conclusiones

La utilización de barreras hidráulicas negativas se ha probado como un método efectivo para evitar la intrusión marina en un acuífero costero. En este trabajo, por primera vez, se aboga al uso de estas barreras como medio eficaz contra la pérdida de agua dulce de un acuífero en el mar.

Estas barreras siempre captan un cierto porcentaje de agua dulce, que en el caso de abastecer a una planta desaladora implicaría una reducción en los costes de explotación.

Contribución de los autores

Los dos autores han participado en las distintas tareas realizadas: estructura

del trabajo, metodología, adquisición de datos, elaboración de figuras, discusión de resultados y redacción del manuscrito.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente llevada a cabo en el marco de Ceimar y Ceia3 y financiada a través del proyecto PID2019-108832GB-I00 del MICINN y UAL2020-RNM-B1953 (UAL-FEDER).

Agradecemos los comentarios y correcciones realizadas por los revisores anónimos.

Referencias

Armanuos, A.M., Al-Ansari, N., Yaseen, A.M. (2020). *Water* 12(9), 2403. <https://doi.org/10.3390/w12092403>

Custodio, E., Llamas, M.R. (1978). *Hydrología Subterránea*. Omega, Barcelona, 2350 p.

Ebeling, P., Händel, F., Walther, M. (2019). *Science of Total Environment* 693, 133478. <https://doi.org/gk7s6j>

Pool, M., Carrera, J. (2009). *Hydrogeology Journal* 18, 95–105. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0516-1>

Stein, S., Yechieli, Y., Shalev, E., Kasher, R., Sivan, O. (2019). *Water Research* 156, 46–57. <https://doi.org/gp9zrf>

Stein, S., Sola, F., Yechieli, Y., Shalev, E., Sivan, O., Kasher, R., Vallejos, A. (2020). *Science of the Total Environment* 732, 139249. <https://doi.org/gp94mf>

Wu, H., Lu, C., Kong, J., Werner, A.D. (2020). *Water Resources Research*, 56, e2020WR027792.

<https://doi.org/10.1029/2019WR025750>