

# LOS ACUÍFEROS COSTEROS Y EL SUMINISTRO DE AGUA DE MAR A LAS PLANTAS DESALADORAS

## *Coastal aquifers and seawater supply to desalination plants*

Antonio Pulido-Bosch (\*) y Tomás Rodríguez Estrella (\*\*)

### RESUMEN

Amplias regiones del planeta sufren las consecuencias de una escasez permanente o estacional de agua. Las áreas costeras, gracias a los avances de la tecnología de desalación, pueden utilizar las plantas desaladoras. El suministro se puede hacer tomando el agua directamente del mar (tomas abiertas), o mediante sistemas de captación en la franja litoral, aprovechando así el poder depurador y filtrante de los sedimentos costeros. Sondeos verticales, perforaciones horizontales dirigidas (PHD), túneles paralelos a la costa con taladros laterales, zanjas drenantes, son otras tantas alternativas posibles. Se concluye que la instalación de una planta desaladora tiene que tener en cuenta la identificación de áreas acuíferas costeras con características favorables para la captación de agua de mar en ellas, para así reducir considerablemente los costos de explotación posteriores.

### ABSTRACT

Extensive areas of our planet suffer the consequences of permanent or seasonal water shortage. Thanks to advances in desalination technology, coastal areas can now use desalination plants. The seawater can be supplied either by taking water directly from the sea (open intakes), or using abstraction systems along the coastal belt, which take advantage of the filtration and purification of the coastal sediments. Vertical boreholes, horizontal directional drilling (HDD), tunnels running parallel to the coast with lateral bores, and interceptor drains, are other possible alternatives. It is concluded that the installation of a desalination plant must identify and take account of coastal aquifers whose characteristics favour the tapping of seawater, in order to considerably reduce subsequent exploitation costs.

**Palabras Clave:** Desaladoras, acuíferos costeros, captación, seguimiento.

**Keywords:** Desalination plants, coastal aquifers, intakes, monitoring

### INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que el sudeste peninsular es el área de mayor aridez de Europa; hay sectores donde la precipitación media anual es inferior a 200 mm, lo que implica una disponibilidad hídrica muy escasa. Además, los acuíferos costeros mediterráneos han sido sometidos a una explotación intensiva durante los últimos 40 años como consecuencia del desarrollo económico ligado al turismo y a la agricultura también intensiva. Una de las consecuencias inmediatas de la falta de previsión en la explotación ha sido la aparición de procesos de intrusión marina generalizados en el litoral. La actual política hidráulica ha optado, entre otras actuaciones, por la construcción de plantas desaladoras para solucionar el grave problema planteado. Esta solución es –en principio– técnicamente viable, especialmente tras el avance conseguido en los últimos años, que ha reducido notablemente los costes de explotación.

En este contexto, los acuíferos costeros toman un nuevo protagonismo por ser fuente de suministro de agua a las plantas desaladoras, reduciendo o casi eliminando los inconvenientes que tienen las tomas

directas de agua de mar. El material acuífero se encarga de reducir el Carbono Orgánico Total (COT), los microorganismos, así como las partículas arrastradas y en suspensión, a condición de diseñar adecuadamente las captaciones. En España (Baltanás, 2006) existen actualmente 20 plantas desaladoras de capacidad comprendida entre 20 000 y 125 000 m<sup>3</sup>/día (Tabla 1), y hay 21 más en proyecto, a realizar en los próximos años (Fig. 1). La mayor de todas, la de Carboneras, funciona en la actualidad a algo menos del 20 % de su capacidad teórica.

El objetivo del presente artículo es exponer los principales métodos de suministro de agua de mar a las plantas desaladoras, con un interés especial en la utilización de los acuíferos costeros como intermedios favorecedores de la eliminación de finos arrastrados y de microorganismos. Asimismo, queremos enfatizar en la ventaja de la utilización de los acuíferos costeros en el abastecimiento así como en los aspectos a tener en cuenta, en ese caso.

En la figura 2 se muestra el croquis general de una planta desaladora de cierta envergadura, con indicación de las fases y procesos más relevantes. Co-

(\*) GIRHyGA, Departamento de Hidrogeología, Universidad de Almería. apulido@ual.es

(\*\*) Universidad Politécnica de Cartagena. tomas.rodriguez@upct.es

Nombre o lugar	Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	Año construcción
Carboneras	125.000	2004
Cartagena	65.000	2004
Palma de Mallorca	63.000	1998-2001
Las Palmas III	63.000	1990-2001
Marbella	55.000	1997
Almería	50.000	2004
Alicante	50.000	2003
Las Palmas-Telde	35.000	2004
Cd. Reg. Mazarrón	30.000	1997-2000
SE Gran Canaria	22.000	2001
Jávea	26.000	2002
Sta. Cruz de Tenerife	28.000	1995-2000
Tordera	22.500	2001
Adeie-Arona	20.000	1998-2000
Lanzarote III	20.000	1992-1996
Inalsa IV	20.000	1999

Tabla 1.- Principales plantas desaladoras construidas en España.



Fig. 1.- Localización de las plantas desaladoras (círculos negros) previstas construir dentro del programa AGUA (MMA, 2005) con indicación de su número por provincias.

mo puede verse, el núcleo esencial corresponde a los bastidores en donde se realiza la ósmosis inversa, aunque hay toda una serie de actividades previas y posteriores, incluyendo la de recuperación de parte de la energía aplicada (unas 70 atmósferas de presión para conseguir que el agua pase a través de las membranas en donde deja la sal y del orden del 50 % del agua total, lo que constituye el *rechazo* que es devuelto al mar).

## LOS SUMINISTROS DE AGUA DE MAR A LAS PLANTAS DESALADORAS

### Modalidades

La forma más intuitiva de suministro es la *toma abierta* o toma directa de agua de mar. Esta modalidad requiere que el agua sea sometida a costosos tratamientos tendentes a eliminar las partículas arrastradas y en suspensión, así como la materia orgánica y cualquier tipo de organismo. Para grandes plantas –más de 200.000 m<sup>3</sup>/día de producción- es prácticamente la única opción y la más viable desde el punto de vista económico (Voutchkov, 2004 y 2005; Guillén, 2007)

En los demás casos, la toma de agua de mar mediante *obras de captación en el acuífero litoral* suele ser la solución más adecuada y la menos costosa, al reducir sensiblemente los tratamiento del agua, a condición de que exista un acuífero con las características adecuadas en la franja litoral (Gille, 2003).

Siempre cabe una opción *mixta*, es decir, parte del agua suministrada con obras en el acuífero costero, complementadas en períodos de mayor demanda, por ejemplo, con una toma abierta. En lo que sigue nos vamos a ocupar esencialmente de la segunda modalidad indicada.

### La captación en los acuíferos costeros

#### Aspectos generales

Existen numerosas variantes posibles para captar agua de mar con la menor cantidad posible de arrastres. Lo más usual consiste en la perforación

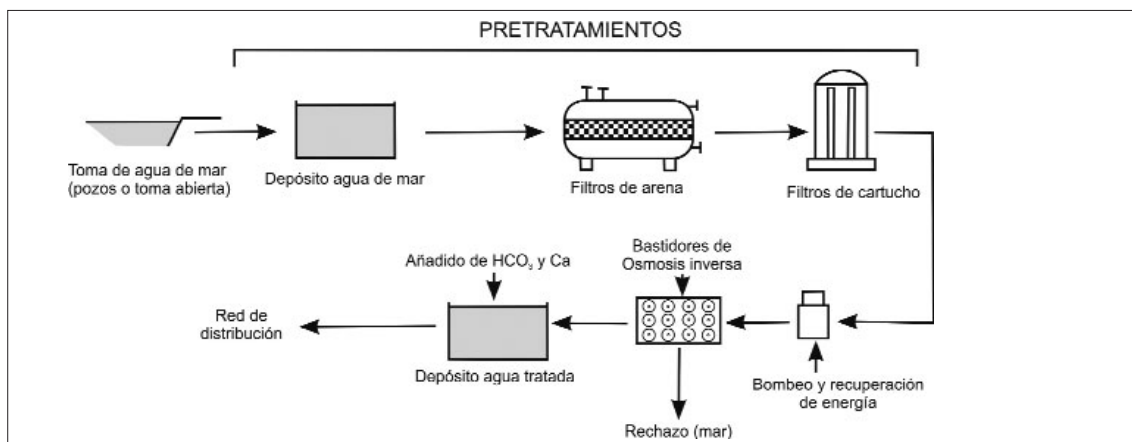


Fig. 2.- Croquis general de una planta desaladora de gran tamaño.

de sondeos verticales, aunque caben todas las combinaciones posibles tan ingeniosas como permita el acuífero, la imaginación y el presupuesto (Pulido Bosch et al., 2004).

Recordemos que en los acuíferos costeros bien comunicados con el mar el contacto agua dulce-agua salada en régimen natural tiene una superficie convexa hacia el mar, con el agua dulce por encima, al ser menos densa (Fig. 3). La aproximación de Ghiben-Herzberg permite estimar la profundidad del agua salada en un punto multiplicando por 40 la altura piezométrica del agua dulce  $h_d$ . Si a 200 m de la costa  $h_d$  en un pozo vale 1,5 m, el contacto agua dulce-agua de mar se encontraría a aproximadamente 60 m de profundidad. En realidad no existe un contacto neto sino toda una franja de espesor variable denominada *interfase*, con valores de salinidad comprendidos entre los extremos del agua dulce y del agua de mar.

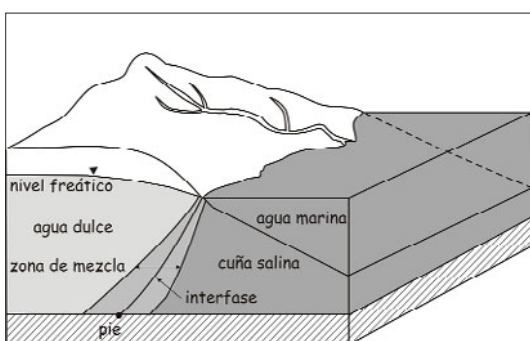


Fig. 3. Esquemización del contacto agua dulce-agua salada en un acuífero costero.

#### Sondeos verticales

Cuando el entorno hidrogeológico es adecuado, la perforación de pozos cercanos a la línea de costas es el procedimiento más adecuado. Un correcto conocimiento de la estratigrafía e hidrogeología del entorno a captar puede ser un buen comienzo. Si no existe esa información, será preciso llevar a cabo un estudio que permita acotar las características del área a captar. La prospección geofísica eléctrica u otras técnicas geofísicas más costosas, como sísmica, son herramientas de gran utilidad para llegar a conocer la geometría del sector a captar (Rodríguez Estrella, 2007).

La técnica de perforación óptima, si los terrenos a atravesar son gravas y arenas con proporciones variables de lutitas, es la rotación por circulación inversa, por ser muy rápida y limpia. Este método utiliza una herramienta de corte consistente en un tricono que es refrigerado y lubricado con un fluido de perforación que es muy ligero, por lo que es poco penetrante en la formación captada y, en consecuencia, fácilmente eliminado en las labores de limpieza (Fig. 4).

Este fluido de perforación se introduce por el espacio anular comprendido entre el varillaje y la pared del sondeo, y se recupera por el interior del varillaje. Cumple también la función de arrastrar el detritus de perforación. Dado que la mayor parte



Fig. 4.- Sonda de rotación por circulación inversa y barrena helicoidal preparándose para la perforación del emboquille.

del sondeo discurrirá en materiales saturados en agua de mar, es mejor que se emplee atalugita como lodo de perforación en lugar de bentonita, más tradicional, pero que con el agua salada no se mezcla adecuadamente.

Los diámetros de perforación han de ser compatibles con el uso que se piensa dar al sondeo y a su rendimiento. El “emboquille” o primeros diez o quince metros, normalmente perforados con una barrena helicoidal (Fig. 4), deberá tener 1 m de diámetro y se entubará para evitar desprendimientos. Dado que los rendimientos de las áreas costeras suelen ser muy elevados (de 80 a 140 L/s por cada sondeo debidamente terminado), 600 mm debe ser un diámetro adecuado para continuar la perforación. 100 m suele ser una profundidad total suficiente.

Además de tomar muestras representativas del terreno, de cada metro perforado y de su correcto reconocimiento e interpretación, hay que hacer una testificación del sondeo previo a su entubación. El registro de gamma natural suele ser el más resolutivo en un medio de aguas saladas en donde los valores de resistividad son muy bajos. Este método de testificación mide la radiactividad natural del terreno atravesado y más concretamente la emisión de rayos gamma; la fuente de suministro natural de radiación es esencialmente el potasio 40 especialmente abundante en las arcillas y en la materia orgánica (turberas y lignitos), por lo que en definitiva lo que permite es diferenciar las arcillas de otros materiales; en otras palabras, diferencia los niveles prácticamente imper-



meables que irán con tubería ciega. Para ello se introduce un contador en el sondeo, suspendido por un cable, con un preamplificador, con envío de la señal a la superficie; el equipo consta además de un sistema de registro que se mueve con velocidad proporcional al descenso de la sonda.

La tubería, ante la gran fuerza iónica del agua a captar, ha de ser de un material resistente a la corrosión, por lo que no es deseable que sea metálica. Las hay de un plástico especial muy resistente (Fig. 5) que da muy buen resultado. Tras la entubación hay que proceder a la colocación de un empaque de grava silíceo seleccionada de características decididas esencialmente a partir del análisis granulométrico de las muestras de terreno. Dado que estos sondeos pretenden captar agua de mar, es recomendable que la franja del acuífero ocupada por el agua dulce del acuífero y parte de la franja de transición quede aislada de la fracción filtrante, lo cual se consigue cementando esa franja –normalmente 40-50 m de longitud- y/o añadiendo arcillas expansivas que evitaría el inconveniente del fraguado del cemento, que es exotérmico y puede dañar a la tubería plástica (Pulido Bosch et al, 2004).

Después de realizar las operaciones mencionadas, se procederá a la limpieza del sondeo, utilizando el propio equipo de perforación que dispone de compresores. Tras el desarrollo seguirán los bombeos escalonados que permitirán conocer la curva característica de cada obra y su eficiencia. Asimismo, el caudal de bombeo para la prueba de larga



Fig. 5.- Colocación de una tubería plástica en uno de los sondeos de abastecimiento a la planta desaladora del Andarax.

duración se puede decidir con estos bombeos escalonados. Con todo ello se conocerá muy bien el comportamiento de cada pozo, aunque no hay que olvidar que se trata de que bomben conjuntamente una serie de pozos.

#### *Perforaciones horizontales dirigidas (PHD)*

Esta técnica necesita saber de antemano la naturaleza del terreno a atravesar, con el fin de utilizar los instrumentos adecuados (Fig. 6). Por sus características constructivas en el caso que nos ocupa, la sísmica marina somera suele ser muy resolutive. Primeramente se realiza una perforación de pequeño diámetro desde un foso en el que se introduce un cabezal de perforación inclinado (con hasta 19°), que es dirigido durante la perforación. Los residuos de la perforación son transportados por el lodo de perforación. La localización tridimensional permite controlar en todo momento la situación y la dirección del cabezal, pudiendo incluso salvar obstáculos. El sistema se basa en ondas electromagnéticas emitidas desde un emisor alojado en la lanza de perforación. Un equipo receptor de navegación analiza estas ondas (Pintó, 2004; Peters et al., 2007; Rodríguez Estrella, 2007).

Una vez realizado el sondeo piloto se procede al ensanche hasta unos 600 mm de diámetro mediante un retroensanchador del diámetro deseado. Por último, se introduce la tubería que generalmente se hace desde mar hacia el continente. Es necesario cementar un primer tramo, que debe corresponder con tubería ciega, con el fin de captar solamente agua de mar. También hay que cementar el tramo final a lo largo de unos 20 m. El cemento utilizado es sulfuresistente.

El rendimiento de tales perforaciones suele ser de unos 100 a 150 L/s para longitudes superiores a 600 m y diámetros de perforación de hasta 710 mm. Esta técnica es óptima en terrenos consolidados. En materiales sueltos presenta problemas casi irresolubles.

#### *Túneles con drenes laterales*

La Mancomunidad de los Canales del Taibilla (MCT) ha realizado un original sistema de captación de agua de mar para suministro a la Nueva Desaladora del Canal de Alicante. Dado que en las proximidades de la planta existe un espacio protegido (Saladar de Agua Amarga) catalogado como Zona Húmeda, se ha perforado un túnel de 1 km de longitud paralelo a la costa y a 50 m de ésta, con 3,14 m de diámetro. En su interior se han perforado 103 drenes inclinados



Fig. 6. Máquina de PHD; para la Desaladora del Nuevo Canal de Cartagena.

entre 30° y 60° de la horizontal, de 25,5 m de longitud distanciados entre sí 9,6 m, con tuberías de 130 mm de diámetro que llevan adosado un filtro en los 18 m finales (Rodríguez Estrella, 2007).

El caudal surgente arrojado por cada dren es de 25-30 L/s. El túnel parte de un gran cilindro vertical de 25 m de diámetro (*cántara*, en la jerga de la especialidad) desde donde se bombeará el agua a la planta desaladora (figuras 7 y 8). La cota de la base de la cántara es -14,75 m y -12,5 m la de la base el túnel, por lo que ésta se llenará sin necesidad de bombeo en los drenes. Éstos tienen una válvula de cierre en cabecera que tendrá que ser cerrada por buzos cuando haya que hacer operaciones de mantenimiento en las instalaciones de suministro de agua de mar.

#### Otros sistemas de captación

También cabe la posibilidad de emplear pozos con colectores radiales, tipo Ranney o Felhman o cualquier variante de su principio. Son obras costosas pero susceptibles de aportar grandes rendimientos. Ha habido también intentos de captar mediante zanjas en la franja inframarina a escasa profundidad, en las que se introducen tubos ranurados compatibles con la granulometría de las arenas de la playa, de longitud adecuada y conectadas a un sistema lateral hermético con su pozo correspondiente y desde el que se bombea hacia la planta. Parece claro que este sistema puede ser muy vulnerable a los temporales si la tubería no se ancla adecuadamente.



Fig. 7. Boca de entrada y túnel en la Nueva Desaladora del Canal de Alicante.



Fig. 8. Dren en el interior del túnel.

#### Control y seguimiento

Las infraestructuras de control y seguimiento recomendables en este tipo de captaciones se refieren sobre todo al mantenimiento de las características fisicoquímicas de las aguas captadas y al conocimiento en todo momento de la dinámica del contacto agua dulce-agua salada en sus tres componentes discretos que hemos diferenciado previamente: agua de mar, agua dulce y agua de la franja de mezcla entre ambas. Dado que el parámetro que mejor caracteriza el contenido salino es la conductividad eléctrica, cuya medida automatizada es rápida y sencilla, será el parámetro que debe medirse. De forma complementaria, se recomienda medir igualmente la temperatura del agua, que suele ser diferente y contrastada por el agua dulce y el agua de mar. Por último, la carga hidráulica, que es la que controla los movimientos relativos, es igualmente necesaria que sea incluida dentro de los parámetros a registrar en el caso de los sondeos verticales.

Así pues, se trata de medir tres parámetros que tienen situación diferente en la vertical, por lo que se hace preciso un diseño de sistema de control que tenga en cuenta tal realidad. El recomendado, que corresponde sensiblemente al implementado para el control y seguimiento de los sondeos del Andarax, se muestra en la figura 9 (Pulido Bosch et al., 2002), aunque los tres piezómetros puntuales pueden estar dentro de una perforación de mayor tamaño (Fig. 10).

El esquema consta de tres piezómetros puntuales y uno completo. El primero, y menos penetrante, llevará dos metros filtrantes en la franja de agua dulce, y el tercero algo similar, pero en la franja de agua de mar, por lo que obligatoriamente será mucho más penetrante. El segundo, de profundidad intermedia entre los otros dos, se utilizará para el seguimiento de la franja de mezcla. Cada uno de estos piezómetros llevará incorporado tres sensores, uno de conductividad del agua, otro de temperatura y un último de altura piezométrica. Serán dispositivos tipo almacenador de datos (*data logger*), lo que obliga a colocar una toma de electricidad en su entorno inmediato.

El cuarto piezómetro, de profundidad equivalente al de registro en la franja de agua salada, irá ranurado en todos los tramos permeables y su finalidad es la de poder hacer registros de los parámetros de interés en ellos y tomar muestras de agua a diferentes profundidades, cuando así se requiera (Gühl et al., 2006).

Dado que estos piezómetros no están concebidos para bombear en ellos, su diámetro puede ser bastante menor que el de los sondeos de explotación. Concretamente, recomendamos que se perforen a 400 mm de diámetro y que se entuben con 200 mm de diámetro exterior. Por lo demás, en su construcción se deberá seguir los mismos procedimientos que para los sondeos de bombeo, tanto en lo que a técnica de perforación, testificación, entubación y colocación de tramos filtrantes, empaque de gravas y limpieza y desarrollo se refiere.

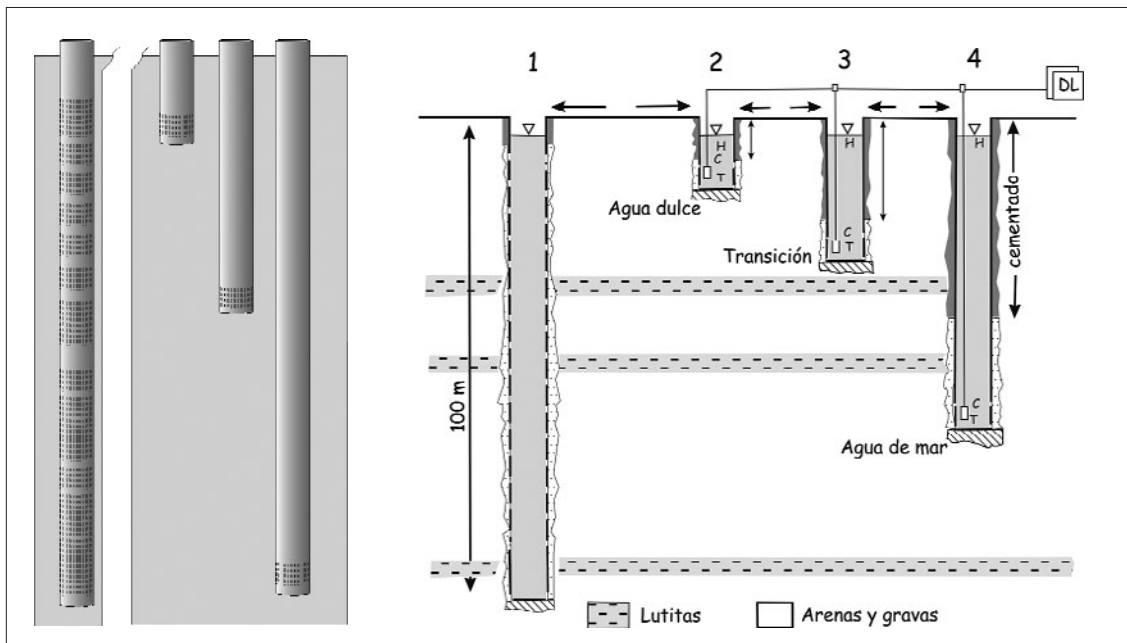


Fig. 9 y 10.-Dos posibles diseños de enjambres de piezómetros para hacer el control y seguimiento del contacto agua dulce-agua salada.

## CONSIDERACIONES FINALES

El gran reto que ha empezado España con la construcción de numerosas plantas desaladoras está obligando a aprender con gran rapidez sobre las singularidades que plantean las nuevas y costosas instalaciones. La necesidad de disponer de un agua entrante lo más limpia posible es un requisito para las sensibles membranas que llevan el peso mayor del proceso de desalación, que es hoy en día la ósmosis inversa, al ser las demás mucho más costosas. Si la toma es abierta hay que filtrar el agua en filtros de arena convencionales, posteriormente en filtros de cartucho, ajustar adecuadamente el pH, añadir sustancias que eliminen la menor traza de microorganismos. Y todo ello durante toda la vida útil de la planta, en un mar que puede estar afectado por temporales que alteran notablemente todos los parámetros.

Es por ello que las tomas mediante captaciones litorales adecuadamente diseñadas pueden ahorrar la importante inversión en tratamientos, al captar un agua sin prácticamente arrastres, pH bien regulado, y sin indicios de microorganismos. En consecuencia, consideramos que es necesario tener muy en cuenta en la ubicación final de una planta desaladora la existencia de acuíferos litorales con las características adecuadas que permitan la captación del agua del mar desde el propio acuífero costero.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una aportación al proyecto IGCP 513 de la UNESCO. Además, la contribución de uno de los firmantes (APB) se ha hecho en el marco de los proyectos CGL2007-63450/HID (MEC) y 017/SGTB/2007 (MMA).

## BIBLIOGRAFÍA

- Baltanás, A. (2006). Spanish push for desalination: part of larger plan. *Desalination*, 99:57-71
- Gille, D. (2003). Seawater intakes for desalination plants. *Desalination*, 156: 249-256
- Guhl, F., Pulido-Bosch, A., Pulido-Leboeuf, P., Gisbert, J., Sánchez-Martos, F. y Vallejos, A. (2006). Geometry and dynamics of the freshwater-seawater interface in a coastal aquifer in south-eastern Spain. *Hydrological Science Journal* 51 (3), 543-555.
- Guillén, E. (2007). La captación de agua de mar en desalación. Comparación de alternativas. III TIAC, MMA (2005). Programa AGUA. [www.mma.es](http://www.mma.es)
- Petersa, T. Pintó, D y Pintó, D. (2007). Improved seawater intake and pre-treatment system base on Neodren technology. *Desalination*, 203: 134-140
- Pulido Bosch, A., Pulido Leboeuf, P. y Gisbert, J. (2004). Pumping seawater from coastal aquifers for supplying desalination plants. *Geologica Acta*, 2: 99-109.
- Pulido Bosch, A., Pulido Leboeuf, P., Sánchez Martos, F., Gisbert, J. y Vallejos, A. (2002). Coastal aquifers and desalination plants. A case study: Almeria, Spain. In: *Groundwater Hydrology*, Sherif, Singh & Al-Rashed (eds). Balkema, pp: 415-434.
- Rodríguez Estrella, T. (2007). La captación de acuíferos para abastecimiento a plantas desaladoras. In "Los acuíferos costeros: retos y soluciones". IGME, 959-978
- Voutchkov, N. (2004). Through study is key to large beach-well intakes. *Desalination and Water Reuse*, 14: 16-20
- Voutchkov, N. (2005). SWRO desalination process: on the beach seawater intakes. *Filtration and Separation*, 10: 24-27

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 17 de octubre de 2007 y aceptado definitivamente para su publicación el 9 de junio de 2008.