

Desalación y sostenibilidad de acuíferos costeros. El caso del delta del río Andarax

S. Jorroto, F. Sánchez Martos y A. Pulido Bosch

Grupo de Investigación "Recursos Hídricos y Geología Ambiental", Universidad de Almería.
Crtra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano. 04120 Almería
E-mails: sjorroto@ual.es – fmartos@ual.es – apulido@ual.es

RESUMEN

Este trabajo analiza, desde un punto de vista hidrogeológico, las consecuencias derivadas de la puesta en marcha de algunas plantas desaladoras que surgieron como solución a los problemas de escasez de agua planteados en el litoral mediterráneo. La falta de perspectiva histórica para conocer las consecuencias reales de tales actuaciones, no solamente en lo que a la evolución del medio se refiere, sino a la aceptación de tales soluciones, hacen necesario el seguimiento y control de una serie de parámetros clave para conocer sus consecuencias a medio y largo plazo y que garanticen la sostenibilidad de la explotación del acuífero costero. En el caso concreto del delta del río Andarax, donde la planta desaladora comenzó a funcionar a finales de 2006, se diseñó un sistema de control en continuo que, unido al uso de testificaciones geofísicas, suponen una fuente de datos que aportan luz tanto desde el punto de vista científico, para el control de los parámetros, como administrativo. La inmediata respuesta de la interfase agua dulce-agua salada a los bombeos y los descensos de ésta, cada vez mayores, permiten caracterizar la dinámica de la "intrusión dulce" y evaluar los posibles problemas que puedan derivarse de este tipo de actuaciones. Por ello la instalación de sistemas de observación y control de la explotación, cuando el agua salada se obtiene a partir de sondeos, resulta ser una buena opción para la gestión sostenible de los acuíferos costeros.

Palabras clave: acuíferos costeros, desalación, intrusión "dulce", sondeos

Desalination and sustainability of coastal aquifers. A case study of the river Andarax

ABSTRACT

This study analyzes the hydrogeological consequences of the commissioning of various desalination plants that have been installed to solve water shortage problems along the Mediterranean coast. The lack of historical perspective on the true consequences of such installations, not only in terms of effects on the hydrogeological environment, but also in terms of the acceptance of such solutions, has created a need to monitor key parameters in order to understand the medium- to long-term consequences and so guarantee the sustainability of the exploitation of the coastal aquifer. In the case of the delta of the river Andarax, the desalination plant began operating towards the end of 2006. Here, a continuous monitoring system was designed which, together with the geophysical logs, provides not only scientific information (for monitoring the parameters), but also administrative information. The immediate response of the freshwater-seawater interface to the pumping regime, and its continuing drawdown, allows the dynamics of the "freshwater intrusion" to be characterised, so that potential problems arising from this type of operation can be evaluated. The installation of systems to observe and monitor the exploitation at the abstraction site, where the saltwater is extracted from boreholes, has proved to be a viable means to assist in the sustainable management of the coastal aquifer resources.

Key words: desalination, boreholes, coastal aquifers, "freshwater intrusion"

Introducción

El litoral mediterráneo engloba numerosas áreas con bajas precipitaciones donde los recursos hídricos superficiales son muy escasos y habitualmente inexistentes. La intensa actividad agrícola y, sobre todo, el turismo desarrollado en las últimas tres décadas, se satisfacen en su casi totalidad con aguas subterráneas, que presentan en muchos casos problemas de calidad. Se puede afirmar que el desarrollo económico de estas áreas guarda una estrecha rela-

ción con la disponibilidad de agua subterránea de buena calidad.

La cuenca mediterránea afronta su futuro con una gran limitación: la escasez de agua disponible que pueda satisfacer las demandas turísticas, agrícolas e industriales. La política hidráulica adoptada para resolver ese problema ha ido desde los trasvases –Tajo, Ebro, Negratín – hasta el actual Programa AGUA que apoya decididamente la construcción de plantas desaladoras (Real Decreto Ley 2/2004, de 18 de junio, por el que se modifica la Ley 10/2001, de 5

de julio, del PHN). La tecnología de desalación ha mejorado sensiblemente en los últimos diez años, siendo la técnica de ósmosis inversa la más competitiva. Estas plantas pueden tomar el agua directamente del mar, aunque es mucho más recomendable abastecerse mediante sondeos litorales que capten el agua bajo la franja de mezcla agua dulce-agua salada, evitando así la materia orgánica y otros arrastres, más abundantes en el mar.

Pero no son solamente las áreas semiáridas las afectadas; el clima mediterráneo se caracteriza por la recurrencia de sequías que hacen que sectores normalmente autosuficientes cada decena de años se enfrenten a una escasez que hace tambalear el esquema económico, con la consiguiente crispación social. En esos años más secos el riesgo de intrusión marina, como consecuencia de la explotación intensiva, es muy elevado. En algunos casos, la recarga artificial puede paliar el problema, aunque en el caso de los acuíferos costeros siempre existe el riesgo de que el agua recargada pase directamente al mar.

El objetivo fundamental de este trabajo se centra en poner de manifiesto la problemática asociada a la gestión sostenible de los acuíferos costeros donde se asientan los sondeos que captan agua de mar para el suministro de plantas desaladoras. Para ello es necesario considerar todo los aspectos asociados a la captación de agua de mar, desde el diseño adecuado de las captaciones hasta el establecimiento de una sistema de control hidrogeológico de la franja costera, que permita efectuar un seguimiento en tiempo real de los efectos que produce sobre el acuífero una explotación tan intensa y concentrada espacialmente. Este seguimiento y control constituye un aspecto esencial para la explotación sostenible, ya que permite conocer allí el funcionamiento hidrodinámico. En este trabajo se muestran la experiencia obtenida tras diseñar la captación de agua de mar el delta del río Andarax junto con los primeros resultados generados por la red de control hidrogeológico, tras la entrada en funcionamiento de la planta desaladora de agua de mar.

Las plantas desaladoras

En España existen actualmente 20 plantas desaladoras de capacidad comprendida entre 20 000 y 125 000 m³/día (Tabla 1), y hay 21 más en proyecto a realizar en los próximos años (figura 1). La mayor de todas, la de Carboneras, funciona en la actualidad a algo más del 10 % de su capacidad teórica. El avance tecnológico prosigue, por lo que no es descabellado pensar que se consigan mejoras técnicas que reduzcan los

costes de explotación y que se encuentren alternativas de menos coste ambiental a algunos de los problemas actualmente identificados (Valcarcel, 2006). Las plantas de última generación tienen unos consumos de casi un kwh/m³ menos que las ya construidas y que, en algún caso, todavía no se han puesto en funcionamiento. Respecto a la desalación de agua de mar con la tecnología de ósmosis inversa con recuperación de energía en la salmuera de rechazo, sin incluir el bombeo, la cifra del consumo específico a considerar es de 3,5 kwh/m³. No obstante, y según datos del IDAE, esta cifra se reducirá cerca de un punto hasta valores aproximados de 2,7 kwh/m³ (MMA, 2004), gracias a las innovaciones tecnológicas.

La problemática relacionada con la captación de las aguas saladas o salobres para su desalación pasa por un adecuado diseño de los sistemas de explotación -incluyendo la perforación y terminación de los sondeos, su limpieza y desarrollo- como etapa posterior a la selección de los mejores emplazamientos para ubicar las captaciones. Su importancia es tal, que la ubicación definitiva de la planta tendría que estar condicionada a los resultados de esta fase, aspecto que desgraciadamente no suele tenerse en cuenta. Seguidamente se identifican y describen los principales problemas que se pueden plantear en el momento de seleccionar los emplazamientos de las captaciones y al diseñar los pozos, así como el planteamiento de los sistemas de seguimiento y control de parámetros a lo largo de la explotación, de acuerdo con la experiencia adquirida en la captación de agua de mar para abastecimiento a la planta desaladora de agua de mar de Almería (Pulido Bosch *et al.*, 2002).

En el entorno de la desaladora de agua de mar de Almería afloran un conjunto materiales detríticos deltáicos, fluvio-deltáicos y marino-deltáicos. Las litologías, en general, varían en la vertical desde limos y arcillas de diversos colores hasta gravas con bolos de varios centímetros de diámetro, pasando por arenas de diversos tamaños. Desde el punto de vista hidrogeológico, el delta del río Andarax constituye el área costera del Acuífero Detrítico del Bajo Andarax, que se extiende a lo largo del sector central del valle del río Andarax e incluye materiales cuaternarios-aluviales y deltáicos junto a conglomerados arenoso-limosos fluvio-deltáicos pliocenos (Sánchez Martos, 1997). Los materiales acuíferos en el delta, corresponden a formaciones de clara influencia marina, en continuidad lateral con los materiales aluviales. En los sondeos efectuados en la desembocadura del Río Andarax para la planta desaladora de agua de mar, la serie atravesada corresponden con 3 ó 4 metros de limos superficiales, debajo de los que existen 30 ó 40

Nombre/lugar	Capacidad (m ³ /día)	Año construcción
Carboneras	125.000	2004
Cartagena	85.000	2004
Palma de Maiorca	63.000	1998-2001
Las Palmas II	63.000	1990-2001
Marbella	55.000	1997
Almería	50.000	2004
Alcánte	50.000	2003
Las Palmas-Takla	35.000	2004
Cd. Reg. Mazarrón	30.000	1987-2000
SE Griet Ceceba	22.000	2001
Jávea	26.000	2002
Sta. Cruz de Tenerife	28.000	1995-2000
Tortosa	22.500	2001
Adria-Arona	20.000	1998-2000
Lanzarote III	20.000	1982-1990
Inhata IV	20.000	1999

Tabla 1. Principales plantas desaladoras construidas en España
Table 1. Principal desalination plants built in Spain

metros de depósitos más groseros que representan la prolongación de los depósitos aluviales del río, tras los cuales existe un nivel de lutitas, con diferente espesor. Hasta los 80 m predominan las gravas, arenas medias-finas y una alternancia de lutitas. Finalmente un nivel de areniscas bioclásticas cementadas con gran cantidad de fósiles marinos, separa estos materiales de los depósitos limosos pliocenos, que en su parte superior presentan unos niveles detríticos más groseros.

Aspectos constructivos

La técnica de perforación a elegir es de gran relevancia, ya que la duración de la obra, la bondad de la terminación, y los problemas de ejecución dependen de ello. En principio, cualquier método capaz de perforar en diámetro superior a 600 mm podría ser adecuado, aunque el óptimo estaría en aquel que sea rápido, limpio, preciso en la asignación litológica, y que garantice adecuadamente la estabilidad de las paredes.

La percusión, sin apenas limitaciones de diámetro ni restricciones en función de litologías, podría ser una técnica de perforación útil. No obstante, puede plantear algunos problemas que limitan seriamente su aplicabilidad. Su reducida velocidad de perforación unida a la naturaleza de los materiales, muchas veces detríticos, hacen aumentar notablemente el riesgo de desprendimientos. La solución suele pasar por el empleo de una entubación auxiliar, lo cual

añade un problema más, ante la dificultad que normalmente supone su retirada posterior.

La perforación a rotación normal, con lodos bentónicos, es una técnica muy rápida, pero los mayores inconvenientes pueden derivar de la adecuada eliminación del filtrado de lodos. Conviene tener presente que parte de la perforación se efectuará en un medio saturado con agua salobre y agua salada con la composición cercana a la del agua de mar; los lodos convencionales pueden plantear algunos problemas, para cuya solución se podría acudir al aumento de la densidad para limitar el paso del agua de la formación al espacio perforado, con el inconveniente de incrementar la dificultad de eliminación del reboque y la consiguiente disminución del rendimiento del sondeo; tampoco elimina el problema de la pérdida de solubilidad, por lo que habría que acudir a lodos específicos para aguas saladas (Driscoll, 1986). Siempre se tiene la opción de emplear lodos degradables que, aunque más costosos que los convencionales, tienen la ventaja de eliminarse transcurrido un cierto tiempo.

El método de rotación por circulación inversa es posiblemente el que tradicionalmente se ha considerado como óptimo en la perforación de materiales sueltos, dada la gran facilidad de perforación en grandes diámetros, rapidez y limpieza elevada, especialmente si se emplea agua como fluido de perforación. Algunos de los problemas que se siguen planteando con este procedimiento derivan del hecho de que raramente se perfora únicamente con agua, aunque usualmente son lodos de más fácil eliminación que los normales de rotación. En la planta desaladora de Almería los sondeos se perforaron mediante circulación inversa. Los problemas durante la perforación del emboquille fueron debidos a la situación de algunos sondeos sobre residuos sueltos, por lo que en algunos sondeos se utilizó una máquina de percusión para realizar el emboquille.

Un problema, común a casi todas las técnicas, es el de la asignación del detritus recogido a la profundidad real. La segregación gravitatoria que se suele producir puede traer consigo errores de varios metros en columnas de perforación inferiores a 100 m. La importancia de este hecho es máxima, especialmente a la hora de definir los tramos filtrantes.

Por todo lo indicado anteriormente, resulta imprescindible realizar una testificación geofísica de la perforación, previamente a la definición de la entubación. Los métodos eléctricos pierden resolución o los resultados no son fácilmente interpretables cuando se mide en la franja saturada en agua salada. Posiblemente sea la testificación de rayos gamma la que mayor información aporta y es de interpretación



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

Fig. 1. Location of the future desalination plants (black points) in the AGUA Program (MMA, 2005) with the numbers of them by provinces

más sencilla, ya que suele ser muy resolutiva en la diferenciación de los tramos arcillosos. En los sondeos perforados a rotación con circulación normal o inversa se facilita la conexión de los electrodos con la formación al existir fluido de perforación rellenando el hueco; las características fisicoquímicas de los lodos tienen que ser tenidas en cuenta al momento de interpretar los registros (Chapellier, 1987).

En la planta de Almería se realizó una detallada testificación geofísica que fue interpretada junto con la columna litológica levantada a partir del detritus representativo del sondeo. Los parámetros testificados fueron potencial espontáneo, sonda monoelectrónica, rayos gamma, resistividad normal corta y larga, temperatura y conductividad del agua. En los sondeos perforados a rotación con circulación normal o inversa se facilita la conexión de los electrodos con la formación al existir fluido de perforación rellenando el hueco; las características fisicoquímicas de los lodos tienen que considerarse en el momento de interpretar los registros. En la figura 3 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados de una testificación geofísica realizada en el sondeo número 2.

Cuando se capta una formación acuífera constituida por materiales sueltos es imprescindible prever la colocación de un macizo filtrante artificial de gravas, para cuya selección existen diversos métodos, (Driscoll, 1986; Hilliard, 1997). La naturaleza silíceo de los cantos es deseable en todos los casos, debido a su mayor resistencia a la corrosión. Una vez instalado el empaque es recomendable prever un sistema que permita añadir más grava silíceo seleccionada, ya que durante el proceso de limpieza y desarrollo pueden producirse asentamientos y reestructuraciones de los granos.

Al tratar de captar el agua salada bajo la franja de mezcla, lo más apropiado es aislar el tramo superficial de agua dulce mediante cementación y/o colocación de un material aislante en el espacio anular pared del sondeo-tubería. El aislamiento es deseable que se prolongue algunos metros dentro de la franja de agua salada, en previsión de eventuales cambios en la geometría de los contactos con el avance de la explotación. Existen productos comerciales que cumplen el mismo objetivo que el cemento y que tienen la ventaja de no provocar cambios físicos, como por ejemplo el que lleva aparejado el fraguado del cemento.

Terminación

Tras analizar los diferentes registros obtenidos de la testificación geofísica junto con las muestras obtenidas, se procedió a definir la columna de entubación. Un aspecto significativo son las divergencias que se han llegado a medir entre el detritus obtenido por el sondeo a una profundidad determinada y el resultado de las diagráfias, puesto que algunos casos han sido superiores a 5 metros. Esto tiene gran importancia práctica ya que, si se diseña la disposición de los filtros exclusivamente a partir de la columna litológica obtenida mediante el detritus de perforación, se pueden cometer graves errores en la ubicación de los tramos filtrantes, que afectarían al rendimiento de la obra, la calidad del agua bombeada y a la vida media de los equipos de bombeo.

En las áreas costeras hay que ser especialmente cuidadoso con el material que compone la tubería y los filtros, ya que se trata de aguas con gran fuerza iónica y notable poder de corrosión. Las tuberías plásticas especiales, de las que existen en el mercado diferentes marcas específicas para sondeos de captación de aguas, serían las más resistentes a la corrosión, aunque tendrían menor resistencia mecánica. Hoy en día existe una tecnología que ha puesto a punto material plástico de gran resistencia, aunque

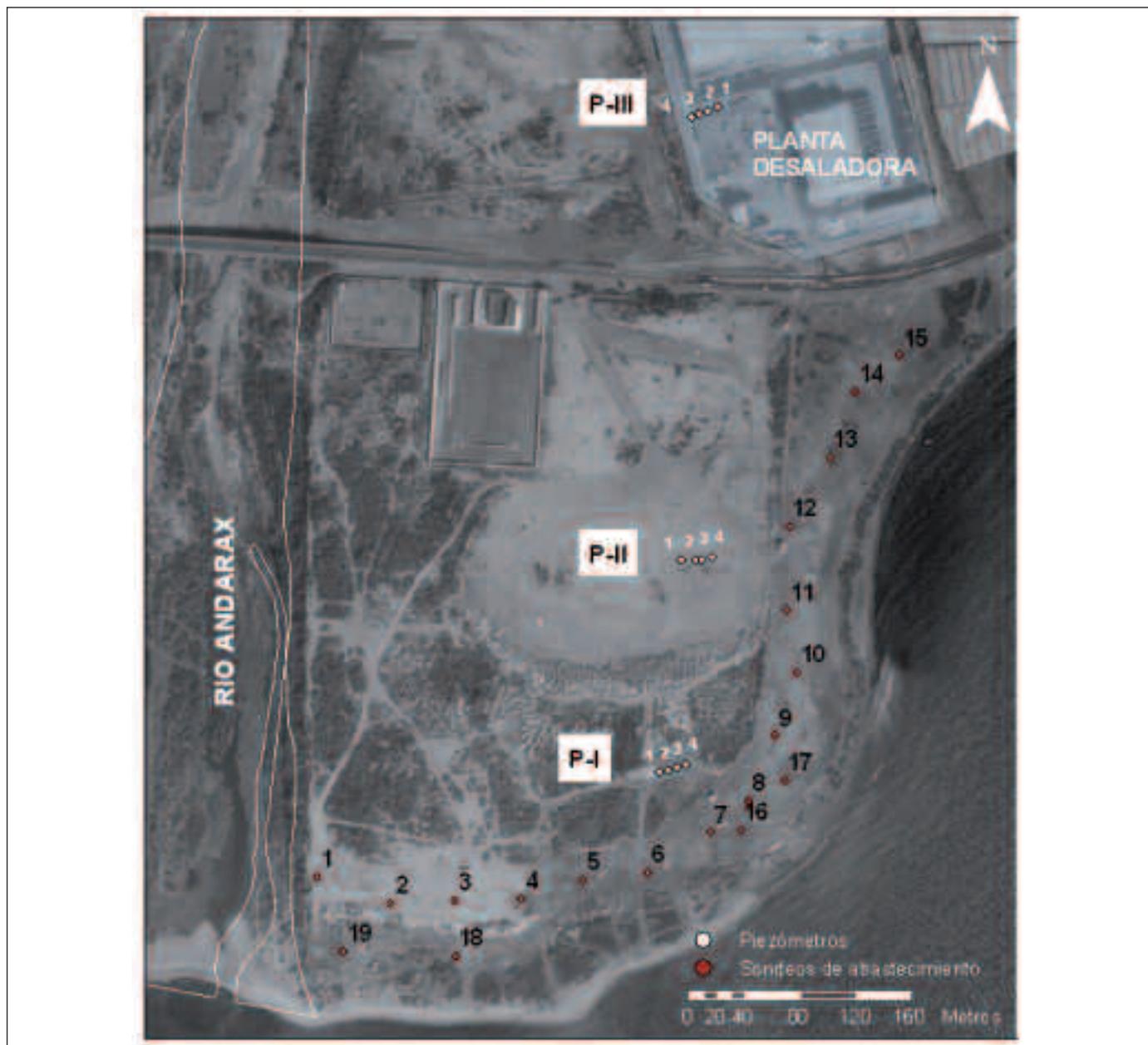


Fig. 2. Situación de la desaladora, el campo de sondeos y posición de los tres grupos de piezómetros (P-I, P-II, P-III) de control y seguimiento del contacto agua dulce-agua salada
Fig. 2. Location of the desalination plant, supply boreholes and the three groups of piezometers (P-I, P-II, P-III) to control the freshwater-saltwater contact

para ello tienen que tener un grosor elevado (19 mm para tubería de 450 mm de diámetro exterior).

En las captaciones de agua de mar situadas en el delta del río Andarax se seleccionó una tubería –ranurada y ciega- plástica especialmente resistente. Todos los sondeos se terminaron con un cierre (tapón de madera) que tiene como función impedir el eventual acceso de materiales detríticos al interior de la entu-

bación. La ranura de la tubería seleccionada fue de 1 mm de abertura. Se colocaron entre un 20-31% de tubería filtrante, en tramos de al menos un metro de longitud. Estos tramos de tubería con filtro coincidían con gravas y arenas bien clasificadas. El primer tramo ranurado se situó entre los 35 y 53 m de profundidad para evitar la entrada de agua dulce.

En la figura 4 se muestra un sondeo-tipo donde se

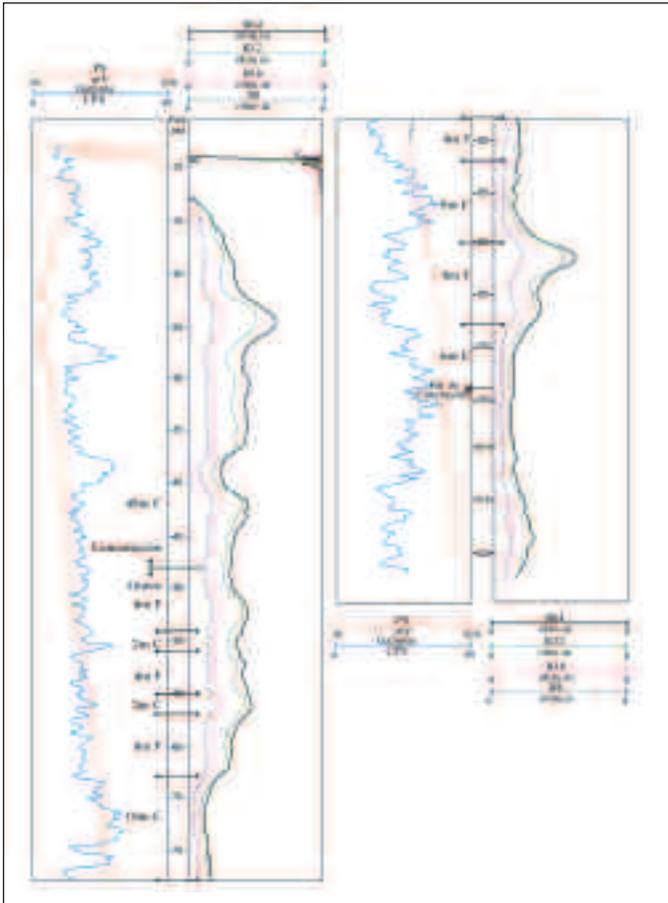


Fig. 3. Registro de potencial espontáneo, resistividad eléctrica y gamma-ray en el sondeo n° 2. Se indican los tramos de tubería ciega (C) y filtrante (F), junto con la interpretación de los diferentes registros

Fig. 3. Logs of spontaneous potential, resistivity and gamma in borehole 2. The lengths of screened and unscreened ling are indicated, based on these data. F: screen; C: casing

sintetizan las características de los diecinueve sondeos construidos, la profundidad de la perforación, características de la entubación (tramos con rejilla y ciegos) y la cementación.

El desarrollo es un procedimiento fundamental para la ejecución de pozos en acuíferos detríticos con abundantes arenas ya que mejora su rendimiento y alarga la vida del pozo. Estas operaciones tienen notables ventajas y su coste económico se compensa posteriormente (Detay, 1997).

Tras las operaciones de desarrollo se produjo una reducción en el descenso alcanzado para un mismo caudal de bombeo. Los resultados han sido muy variados, desde el caso de algunos sondeos en los

que las operaciones de desarrollo no fueron efectivas, hasta otros en los que se produjeron disminuciones de los descensos de 4 a 5 metros para caudales de 100 a 130 l/s. En la figura 5 se muestran los datos correspondientes al pozo 4 en los tres desarrollos efectuados, con aumentos muy pequeños de caudal y repitiéndolo en algunos casos, hasta tres veces. También se representan los datos del ensayo de bombeo escalonado que se realizó después de efectuar el desarrollo durante 24 horas, mostrando la disminución de los descensos alcanzados durante el ensayo de bombeo con respecto a los descensos alcanzados durante el desarrollo (Sánchez - Martos *et al.*, 2002).

El sistema de control

Cuando se extraen elevados caudales de agua subterránea en el borde del mar es conveniente disponer de un dispositivo de control y seguimiento por la propia seguridad del esquema de aprovechamiento, así como para poder determinar y anticipar eventuales problemas que podrían afectar a terceros. Estos sistemas de control han tener en cuenta la notable heterogeneidad de los depósitos costeros, debido a que se encuentran en los límites de distintos ambientes sedimentarios (continental –aluvial, llanura de inundación, dunas litorales,...- litoral, marino, etc.) cuya influencia relativa ha variado normalmente en el tiempo y en el espacio. Todo ello añade complejidad a la geometría de los diferentes cuerpos sedimentarios, que puede ser muy variable en distancias muy cortas.

El diseño adecuado de una red de control y seguimiento tiene que considerar el modelo conceptual del sistema en el área captada y adaptarse a sus singularidades. Si se parte del esquema más sencillo, es decir, un acuífero asimilable a un medio sensiblemente homogéneo, en la vertical tendremos agua dulce sobre el agua de mar, y una franja de transición de espesor variable entre ambas. La dinámica de las tres franjas puede ser diferente, de ahí el interés de colocar sensores en las tres. Por ello la red de control debe contar, como mínimo, con tres enjambres de tres piezómetros ranurados a diferente profundidad en tres puntos diferentes, a distancias crecientes desde el mar, con el fin de tener una buena definición del comportamiento de los parámetros a lo largo de una línea teórica de flujo.

Con este planteamiento se ha instalado la red de control de la intrusión marina en el entorno de la desaladora de agua de mar de Almería, (situación en la figura 2 y esquema en la figura 6). Los tres grupos de piezómetros, fueron construidos con los mismos

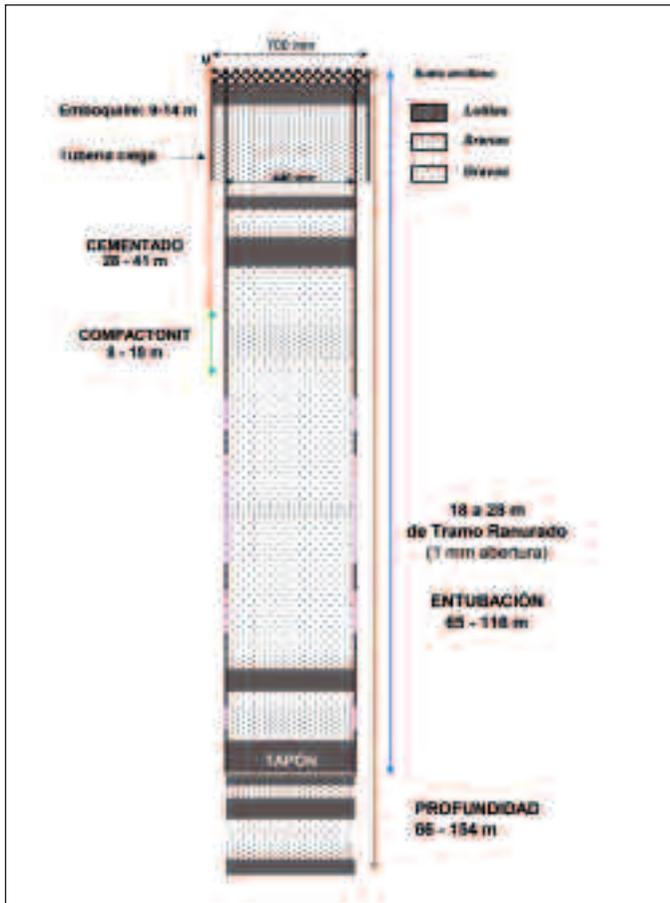


Fig. 4. Sondeo-tipo que sintetiza las características de los sondeos realizados en el delta del río Andarax para la planta desaladora de Almería

Fig. 4. Simplified borehole that represents the general characteristics of the boreholes built in the Andarax delta to supply the desalination plant

pasos que los sondeos de captación (Sánchez Martos *et al.*, 2002), y fueron perforados mediante el sistema de rotación con circulación inversa de lodos. Las diferencias constructivas más importantes residen en el diámetro de la entubación, más estrecha en el caso de los piezómetros (165 mm con ranura de 1 mm).

La red específica de control consta de tres grupos o enjambres de piezómetros, cada uno de los cuales posee cuatro piezómetros sencillos: uno ranurado en todos sus tramos permeables, y otros tres que tienen un solo tramo ranurado de 1 - 2 metros de longitud, situado a diferentes profundidades, con el objeto de que uno sea representativo de la franja de agua dulce, otro de la zona de agua salada y el intermedio de la zona de mezcla. La distribución de detalle de los

piezómetros dentro del enjambre está representada en la figura 6; la diferencia entre cada enjambre reside en la profundidad de los distintos piezómetros, ya que depende de la posición de las franjas de agua dulce y salada en cada grupo de control. En la tabla 2 se muestran las profundidades de cada piezómetro en cada enjambre.

El objeto de medir por separado los tres sectores existentes en la vertical en el acuífero es la obtención de una medida puntual y aislada de los parámetros en cada zona, en especial de potencial hidráulico. Para ello se equipan con sensores y sistema de almacenamiento de datos tipo data-logger (DL), de parámetros tales como la conductividad eléctrica (C), temperatura (T) y nivel piezométrico (H) a los tres niveles citados. La función importante del piezómetro totalmente ranurado, que complementa el enjambre de control, es la posibilidad de hacer registros verticales periódicos de conductividad y temperatura.

Resultados del control

En los piezómetros totalmente ranurados se efectúan mensualmente registros verticales de temperatura y conductividad eléctrica del agua y medidas de flujo subterráneo. La sonda de temperatura-conductividad dispone de un sensor tipo PT100 y registra la temperatura y la conductividad a intervalos prefijados de 1 cm, 5 cm ó 10 cm. El rango de conductividad oscila entre 50 y 64.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la resolución es de 0.05

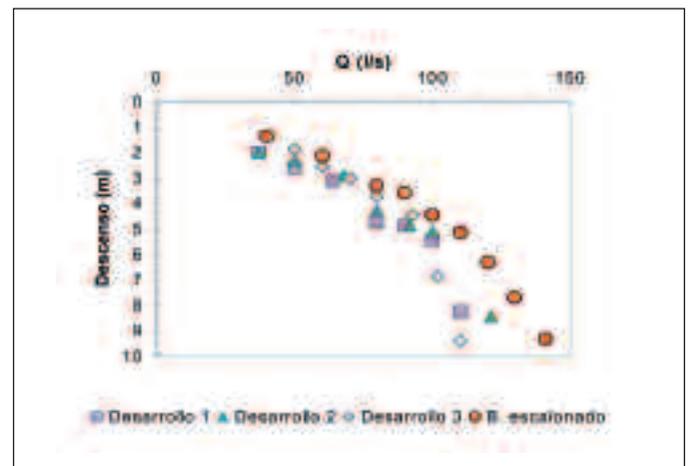


Fig. 5. Relación caudal - descenso en el sondeo n° 4, correspondiente al desarrollo y al bombeo escalonado

Fig. 5. Yield-drawdown relationship for borehole 4, corresponding to development and multiple rate test

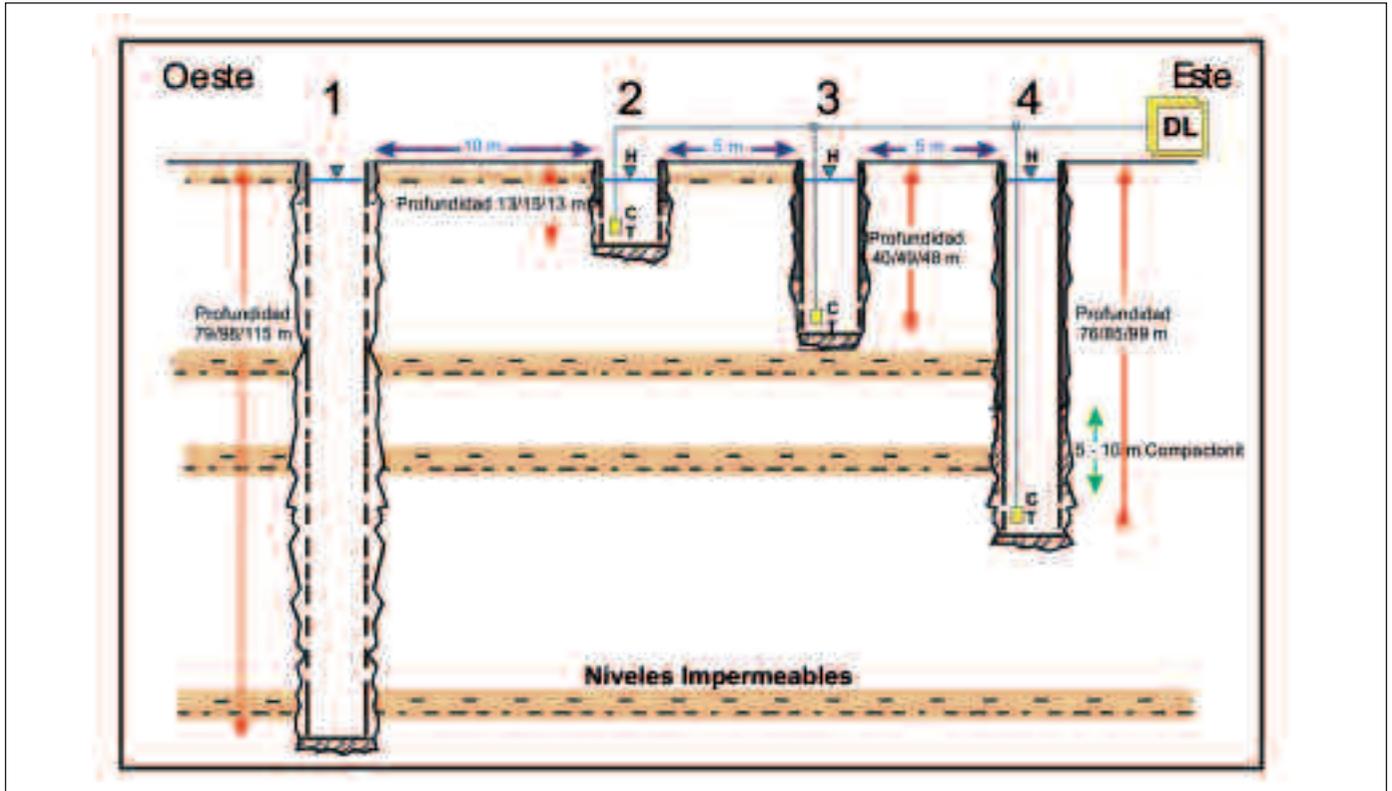


Fig. 6. Esquema de diseño y características generales de los enjambres de piezómetros (Gisbert et al., 2002)
 Fig. 6. Scheme showing the general characteristics of the groups of piezometers (Gisbert et al., 2002)

$\mu\text{S/cm}$ y la precisión de $\pm 2\%$. El rango de temperatura es de $0-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, la resolución es de $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la precisión de $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. La sonda de flujo subterráneo registra en revoluciones por segundo (rps) en un intervalo de $0-50$ rps. Tiene una longitud de 0.48 m y una resolución de 0.025 revoluciones. Cada uno de los enjambres de piezómetros dispone de una estación Meteodata/Hydrodata serie 1256C con un software de comunicación y almacenamiento de datos. Los tipos de sensores así como su rango y precisión se muestran en la tabla 3.

Este amplio registro hace posible analizar temporalmente la evolución de los tres parámetros tanto en condiciones naturales, antes de iniciar la captación de agua de mar, como en un estado influenciado, tras iniciar el bombeo para el funcionamiento de la desaladora.

Para obtener niveles equivalentes de agua dulce, todos los registros de potencial han sido corregidos en función de las variaciones de densidad. Así, las medidas de nivel, ya corregidas, entre junio y agosto de 2006 muestran la evolución del sistema en condi-

ciones naturales. En general se observa gran estabilidad, si bien en un análisis más detallado de los datos se aprecian oscilaciones periódicas en todos los piezómetros. La oscilación más acusada se detecta en el enjambre P-I que está más próximo al mar. Esta fluctuación de niveles se repite con carácter cíclico en las 48 horas representadas en la figura 7, probablemente influenciadas por el efecto de las mareas, atenuándose esta influencia conforme nos alejamos de la costa. En la bahía de Almería el tipo de mareas es semi-diurnas con dos mareas altas y dos mareas bajas, cada una de amplitud diferente (Guhl et al., 2003).

De los datos anteriormente representados cabe destacar, en primer lugar, el valor negativo del nivel en todos los piezómetros, y la escasa influencia de las mareas en los piezómetros ranurados en la franja de agua dulce, cuyos niveles oscilan entre 3 y 5 cm . Por el contrario, las variaciones registradas en el resto de los piezómetros, tanto los ranurados en la interfase como en el agua salada, son considerables. Así, en los piezómetros ranurados en la interfase la oscilación varía entre 16 cm del enjambre I y 9 cm del

Piezómetros	Profundidad sensores (m)	Tramo ranurado (m)	Profundidad Piezómetro (m)
P-I			
2 - Agua dulce	10	9-11	13
3 - Interfase	36	35-37	40
4 - Agua salada	72	71-73	76
P-II			
2 - Agua dulce	10	9-11	15
3 - Interfase	46	45-47	49
4 - Agua salada	83	82-84	85
P-III			
2 - Agua dulce	11	10-12	13
3 - Interfase	46	45-47	48
4 - Agua salada	103	94-96	99

Tabla 2. Resumen de la localización de los sensores de temperatura (T) y conductividad eléctrica (CE)
 Table 2. Location of temperature (T) and electrical conductivity (CE) sensors in the piezometers

enjambre III; y en los piezómetros del agua salada, entre 16 cm del enjambre I y 6 cm del enjambre III (figura 7). En todos los casos la influencia es más acusada cuanto más nos acercamos a la línea de costa.

El análisis de los registros de nivel en un período de tiempo más amplio hace posible estudiar en detalle el comportamiento del sistema bajo diferentes situaciones. En la figura 8 se muestran los registros del enjambre P-II durante los meses de septiembre y octubre de 2006 y se observa la respuesta del sistema a la extracción de agua salada así como su inmediata recuperación una vez que cesan los bombeos. La respuesta en el resto de los enjambres es muy similar, si bien en P-II esta influencia es mayor, dada la proximidad a los sondeos de explotación. Estos bombeos esporádicos y controlados tuvieron lugar antes de la puesta en marcha definitiva de la planta y tenían por objeto poner a punto todas las instalaciones.

En los piezómetros II-3 y II-4 se registra un descenso de 1.1 m en tan sólo cinco horas y media, como respuesta a la extracción de 1415 m³/h de agua salada. Resulta sorprendente la recuperación de los nive-

les, que vuelven a su posición inicial tan sólo 3 h 20' tras el cese del bombeo. En el piezómetro 2, de menor profundidad y situado sobre la franja de agua dulce, se atenúa esta influencia dada la poca profundidad de la perforación.

El bombeo de agua salada se realiza de un modo continuado desde final de septiembre de 2006. Se bombea un caudal continuo cercano a 1.400 m³/h, mediante 5 sondeos, aproximadamente a partes iguales. Los sondeos utilizados no son siempre los mismos, ya que alternan algunos de ellos cada mes. Por ejemplo, durante el mes de septiembre funcionaron los sondeos 8, 10, 12, 15 y 16 mientras que en diciembre fueron los sondeos 2, 5, 12, 15 y 16. A partir de la puesta en marcha, el 25 de septiembre, se registra el mayor descenso de niveles en todos los piezómetros, que es más acusado en los piezómetros ranurados a mayor profundidad (piezómetros 3 y 4). En algunos casos el descenso es 1.8 m en sólo una semana (figura 9).

La tendencia de los niveles en estos tres meses de funcionamiento de la planta es de un descenso pro-

Tipo	Parámetro	Rango	Resolución	Precisión
1830 Series	Nivel	0 – 10 m	0.01	± 0.1%
CT-10SE7INOX	Temperatura	0 – 50°C	0.10	0.15 °C
CT-10SE7INOX	Conductividad	0 - 70 mS/cm	0.10	5 %

Tabla 3. Características de los sensores de nivel, temperatura y conductividad eléctrica de las aguas
 Table 3. Characteristics of hydraulic head, temperature and E.C. sensors

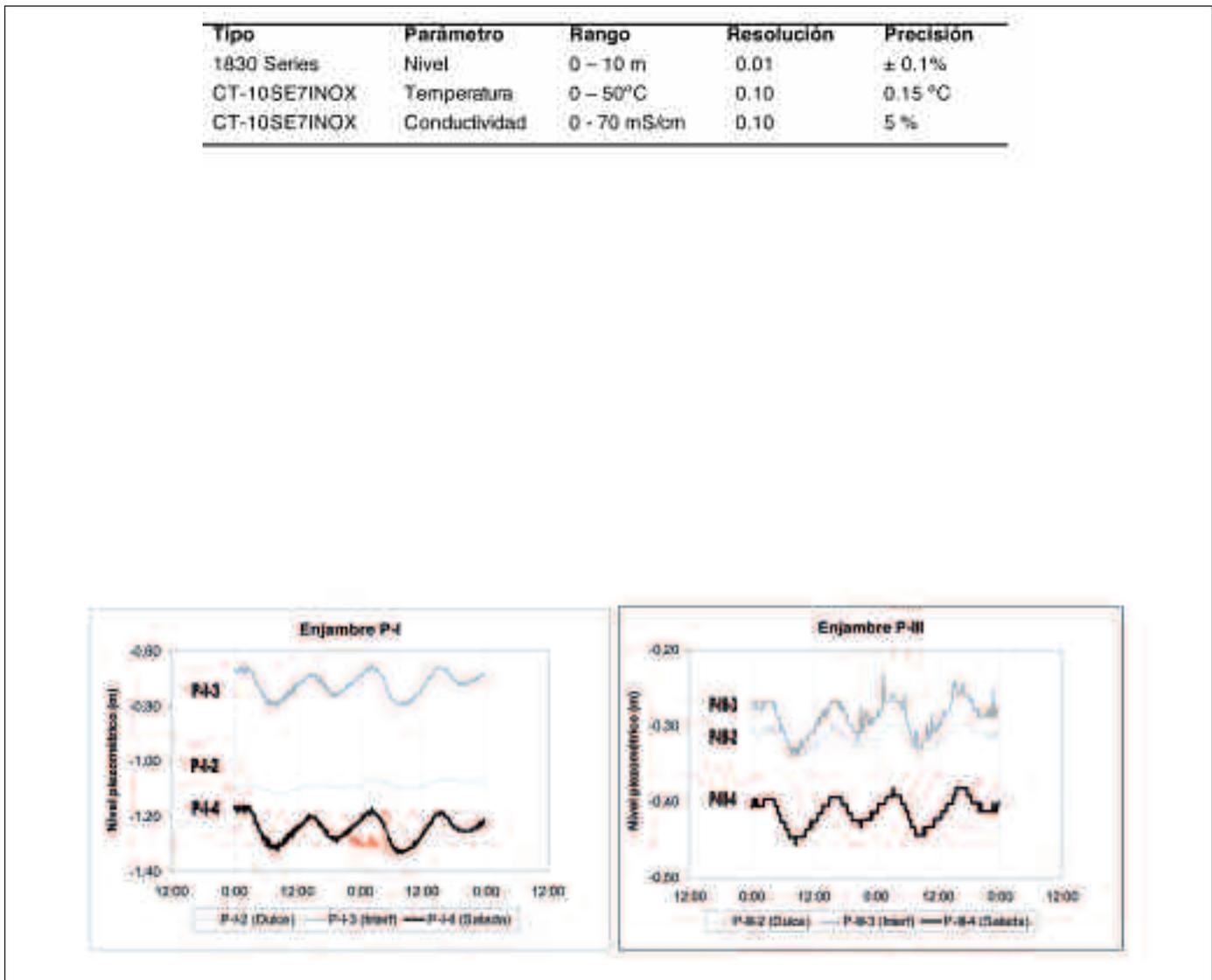


Fig. 7. Fluctuación de niveles piezométricos en 48 horas en estado natural (10 y 11 de junio de 2006). Se amplían registros de P-I y P-III
 Fig. 7. 48 hours hydraulic heads evolution in natural conditions (10th and 11th of June of 2006). P-I and P-III logs are enlarged

gresivo en las proximidades de los sondeos de explotación, si bien se puede hacer un análisis más detallado observándose cambios considerables cuando cambian las condiciones de explotación (figura 9). Así, a principios de octubre se registra un descenso de 30 cm en P-I-3, como consecuencia del cambio del sondeo 10 por el 7, este último, más próximo. A finales de octubre, el descenso registrado se debe a un aumento del caudal bombeado, que pasa de los habituales 1400 m³/h a 1533 m³/h. Por último, el aumento observado el 13 de noviembre, sobre todo en P-I, se debe a la parada de los sondeos 7 y 16 (muy próximos a este enjambre) y la puesta en marcha, en su lugar, de los sondeos 5 y 10, que se encuentran más alejados.

Las testificaciones realizadas en las distintas situaciones de explotación, con y sin bombeos, permiten identificar la localización y el espesor de la interfase agua dulce-agua de mar y ver la respuesta de la salinidad en el acuífero. En la figura 10 se representan registros de conductividad eléctrica realizados en junio, antes de iniciar la captación de agua de mar; en julio, con bombeo de 700 m³/h en período de pruebas y en noviembre, con bombeo continuo de unos 1400 m³/h.

Las testificaciones realizadas a partir de septiem-

bre muestran un descenso notable en la interfase como consecuencia de la extracción continuada de agua salada. El más acusado se produce en los piezómetros I y II que están más cercanos a los sondeos de explotación. Mientras que en condiciones naturales la interfase se sitúa en torno a -20 m.s.n.m, tras la extracción puntual de agua salada se produce un descenso brusco del orden de 24 m. Este descenso se incrementa hasta alcanzar 31 m a los 4 meses de bombeo continuado (registro de noviembre en figura 10). El espesor de la interfase disminuye, puesto que en condiciones naturales es de 28 m y se reduce a tan sólo 2 m en régimen influenciado después de una explotación continuada.

Consideraciones finales

El avance tecnológico de las plantas de desalación por ósmosis inversa permite aportar soluciones a los problemas de escasez de agua en las áreas costeras a condición de que la rentabilidad de las aplicaciones permita cubrir el coste de la desalación. Éste ha disminuido sustancialmente en la última decena de años. Estas plantas garantizan la demanda de agua incluso en las situaciones de sequía más adversas, lo

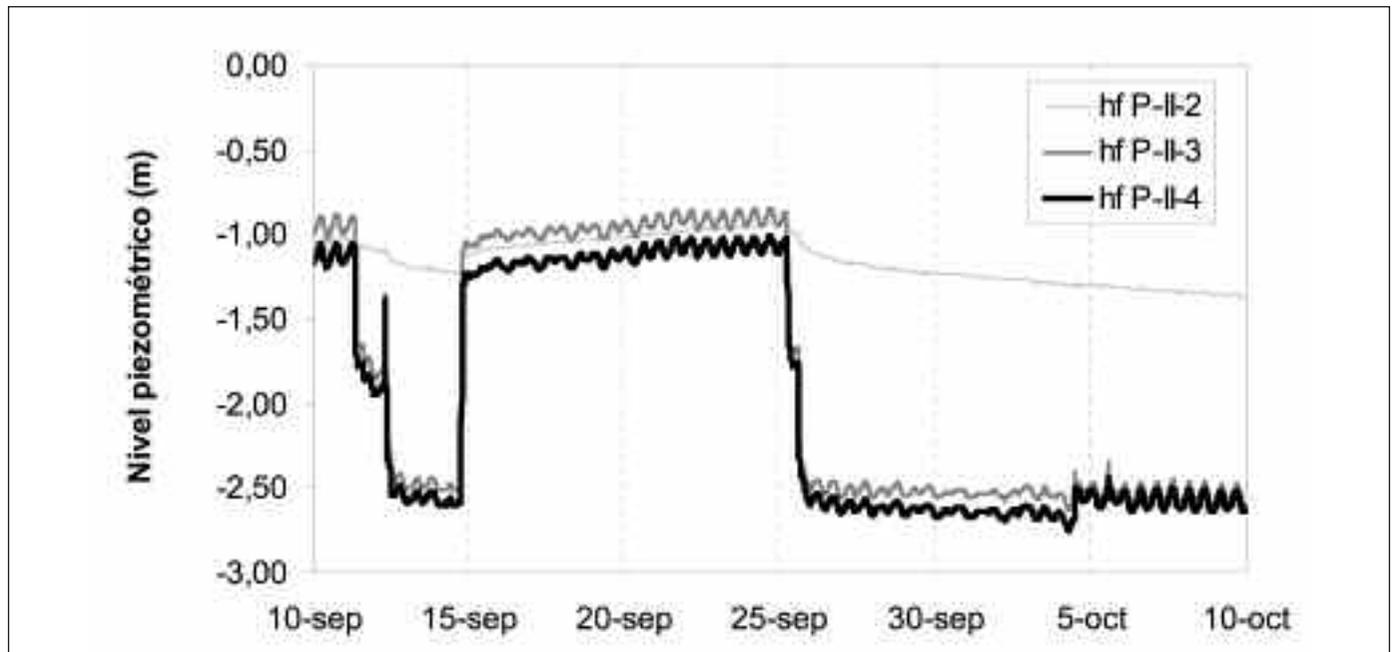


Fig. 8. Registro de niveles en el enjambre P-II durante septiembre y octubre de 2006. La situación de los piezómetros se muestra en las figuras 2 y 6

Fig. 8. Hydraulic heads evolution in P-II during September and October of 2006. Location of piezometers is showed in figures 2 and 6

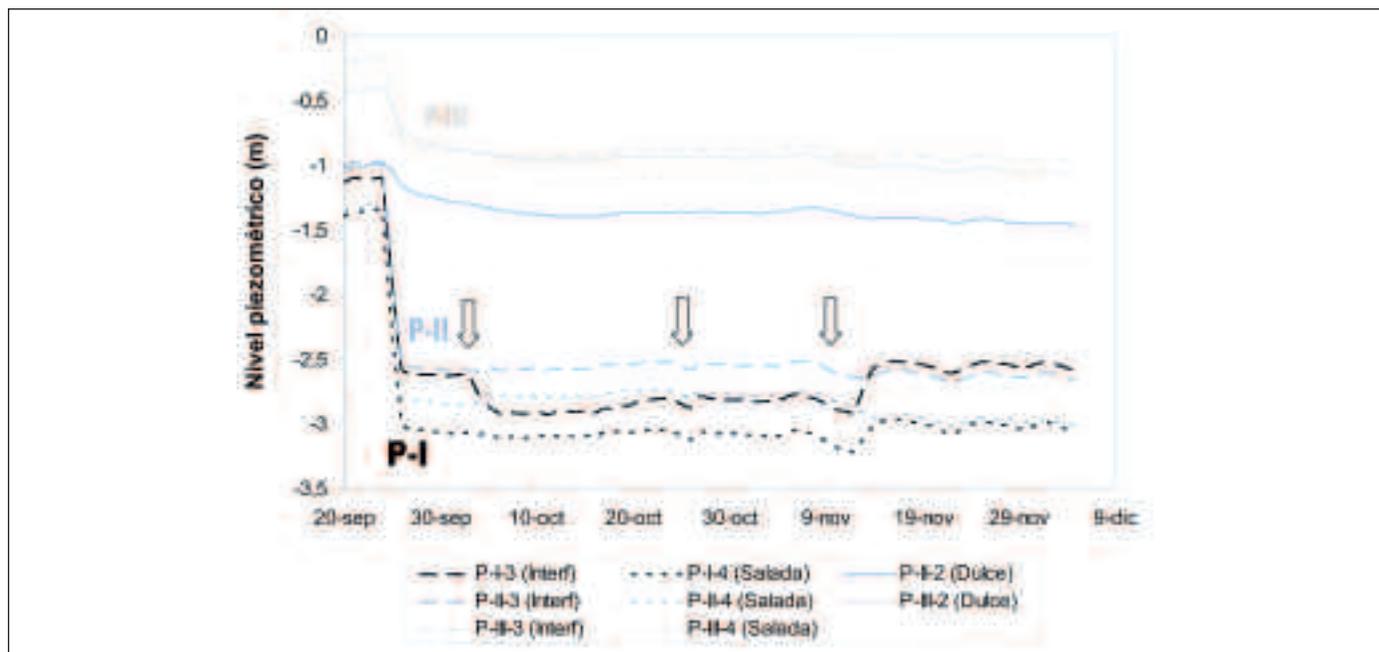


Fig. 9. Evolución de los niveles piezométricos medios diarios desde septiembre a octubre de 2006. La situación de los piezómetros se muestra en las figuras 2 y 6

Fig. 9. Daily hydraulics heads evolution during September and October of 2006. Location of piezometers is showed in figures 2 and 6

que en el caso del turismo configura un escenario totalmente novedoso. No obstante, no se debe olvidar que esta alternativa necesita resolver aún numerosos problemas de muy diversa índole, algunos de los cuales han sido aquí esbozados.

La gestión de los recursos hídricos en las áreas costeras pasa por permitir su sostenibilidad en un medio suficientemente protegido y sin deterioro a medio y largo plazo. Eso requiere medidas que permitan el seguimiento e identificación de impactos, así como el diseño de medidas correctoras y mitigadoras adecuadas. El sistema de observación y control que se lleva a cabo en el delta del río Andarax, con medidas de niveles en continuo unido a los registros verticales periódicos de temperatura y conductividad, constituye una herramienta precisa y rápida para conocer el comportamiento del acuífero ante una intensa explotación. Además, aporta los parámetros necesarios para profundizar en estudio del comportamiento y la geometría del contacto agua dulce - agua salada. El delta del río Andarax constituye un escenario excepcional ya que se dispone de los tres elementos fundamentales para ello: 1) bombeos conocidos de agua salada para abastecer a la planta desaladora, 2) infraestructura hidrogeológica de control, constituida por los enjambres de 12 piezómetros de observación convenientemente ranurados, y 3) medios téc-

nicos y científicos necesarios para llevar a cabo esta observación, en los que son imprescindibles sensores de medida en continuo de niveles piezométricos, temperatura y conductividad eléctrica, así como instrumentación necesaria para la testificación geofísica de sondeos.

Los resultados directos de este control muestran la inmediata respuesta del contacto agua dulce-agua salada al inicio de la captación de agua de mar, que se muestra por su rápido descenso, cada vez mayor, y directamente relacionado con el volumen de agua captado. Estos datos permitirán conocer la dinámica de la "intrusión dulce" y hará posible evaluar los problemas derivados de este tipo de actuaciones en los acuíferos costeros.

Finalmente, debe indicarse que la experiencia es corta y no se sabe muy bien lo que sucederá con la interrelación agua dulce-agua salada y se está lejos de conocer toda la problemática posible. Hay, sin embargo, una cierta experiencia en lo que a seguimiento parcial se refiere (Soler *et al.*, 2005; Jorroto *et al.*, 2005, 2006; Guhl *et al.*, 2006). Es probable que pueda producirse "intrusión dulce", a pesar de que los pozos de bombeo tienen toda la franja de agua dulce aislada con cemento y arcillas impermeables. En este sentido, y dado que el acuífero tiene unos usuarios tradicionales, el arrastre de agua dulce

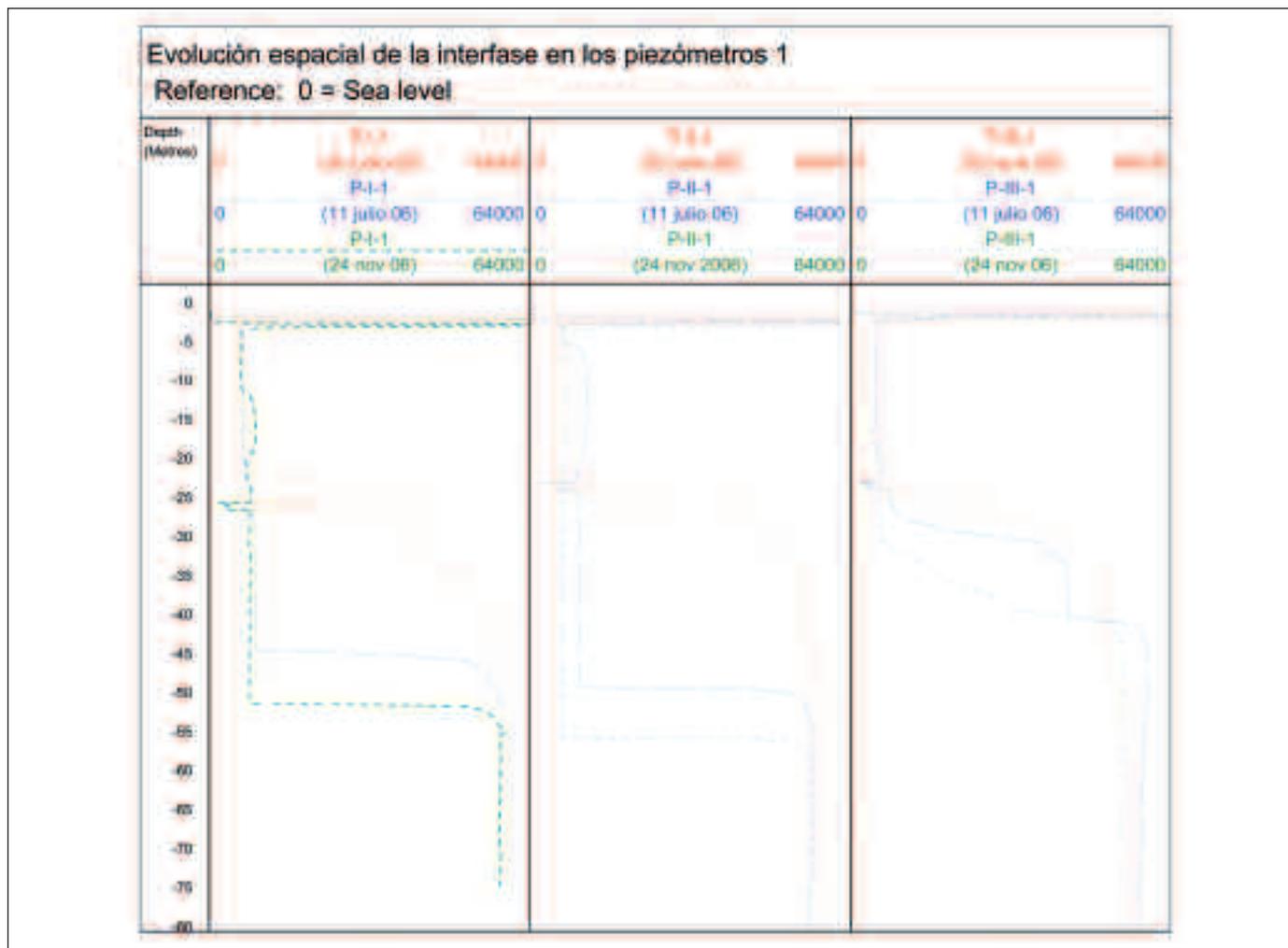


Fig. 10. Registros verticales de conductividad eléctrica en los piezómetros ranurados de los tres enjambres (P-I-1, P-II-1 y P-III-1)
Fig. 10. Electrical conductivity logs in long screened piezometers (P-I-1, P-II-1 and P-III-1)

podría plantear problemas y tener consecuencias legales susceptibles de reclamación.

Otro problema potencial puede ser la subsidencia que tales bombeos pueden inducir en el delta, en donde existen varios niveles semiconfinantes en la serie detrítica atravesada por los sondeos. Esos sedimentos deltáicos son recientes y podrían reorganizarse y compactarse, lo que afectaría a la estabilidad del terreno y a las infraestructuras que descansan sobre él, como son edificios, conducciones y vías de comunicación, entre los elementos más sobresalientes. Podría incluso variar la posición de la línea de costas. Desconocemos la existencia de estudios de detalle al respecto que corroboren lo insinuado, aunque tenemos la intención de iniciarlos en los próximos meses

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado, en parte, en el marco del proyecto ALERT (Contrato No GOCE-CT-2004-505329) financiado por la UE. Agradecemos la colaboración de D. Pedro Velasco, técnico municipal, y a los técnicos de la UTE PRIDESA-ABENGOA, que gestiona la Planta Desaladora de Almería, las facilidades para el acceso a sus instalaciones y el suministro de los datos requeridos. Igualmente, agradecemos a los compañeros del Grupo de Investigación "Recursos Hídricos y Geología Ambiental" su colaboración en los trabajos de testificación geofísica, en especial a Juan Gisbert e Isaac Francés. Finalmente, agradecemos los comentarios y sugerencias de los revisores

del trabajo que han contribuido a mejorar la versión definitiva.

Referencias

- Chapellier, D. 1987. *Diagraphies appliquées à l'Hydrologie*. Ed. Tecdoc. París. 165 p.
- Detay, M. 1997. *Water Wells*. Ed. Masson, 379 pp. París.
- Driscoll, F.G. 1986. *Ground water and wells*. Johnson Div. Saint Paul, Minnesota.
- Gisbert, J., Pulido-Bosch, A., Sánchez Martos, F., Pulido-Leboeuf, P. y Vallejos, A. 2002. Sistemas de control y seguimiento del contacto agua dulce-agua salada en el entorno de la desaladora de Almería. In: *Acuíferos costeros y Desaladoras*. Pulido Bosch, A., Vallejos Izquierdo, A., Pulido Leboeuf, P. A. (Eds.). pp: 185-194.
- 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.
- Hilliard, V., 1997. *Drilling*. Australian Drilling Industry Training Comité Limited. Boca Ratón, ed. Lewis Publication, 615 pp.
- Jorroto, S., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J. y Sánchez-Martos, F. 2005. Las diagráfias y la caracterización de la influencia de los bombeos de agua de mar sobre el acuífero del delta del Andarax (Almería). *Industria y Minería*, 362, 15-21.
- Jorroto, S., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J. y Sánchez-Martos, F. 2006. Análisis de la evolución de la interfase en el delta del río Andarax mediante testificación geofísica. En: *Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas*. Nº 17, 321-328.
- Programa AGUA. *Real Decreto Ley 2/2004, de 18 de junio*, por el que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. BOE de 19 junio de 2004, nº 148, 22453-22457.
- MMA. 2005. Programa AGUA. www.mma.es.
- MMA. 2004. *Memoria ambiental comparativa entre las actuaciones urgentes en las cuencas del mediterráneo y la alternativa al proyecto de transferencias autorizadas por el artículo 13 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional*, 2004.
- 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.
- Pulido-Bosch, A., Vallejos Izquierdo, A. y Pulido-Leboeuf, P. A. (Eds.) 2002, *Los acuíferos costeros y las desaladoras*. Club del Agua Subterránea- G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Almería, 339 p.
- Sánchez Martos, F. 1997. *Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)*. Tesis Doctoral Univ. de Granada. 290 pp.
- Sánchez Martos, F., Pulido-Bosch, A., Pulido-Leboeuf, P., Vallejos, A., Gisbert, J. 2002. Los sondeos de abastecimiento a la planta desaladora de agua de mar de Almería. In: Pulido Bosch, A., Vallejos Izquierdo, A., Pulido Leboeuf, P. A. (Eds.) *Acuíferos costeros y Desaladoras*, Club del Agua Subterránea, Almería, 169-184.
- Soler, A.; Galofré, A.; Otero, N.; Corp, R. M.; Masqué, P.; Mas-Plá, J. y García-Solsona, E. 2005. Cuantificación del aporte de aguas continentales a la planta desalinizadora de Blanes a partir de trazadores isotópicos. *Jornadas Internacionales: De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada*. Alicante. 597-604.
- Valcárcel, E. 2006. Plataforma marina desaladora. CIERTA 2006. *Conferencia Internacional sobre Energías Renovables y Desarrollo Sostenible*. Almería, Vol I, WRE 60-66.

Recibido: enero 2007

Aceptado: junio 2007