

Dinámica del contacto agua dulce-agua salada en acuíferos costeros sometidos a explotación intensiva de agua salada



Figura 1. Situación de la planta desaladora de agua de mar de Almería, indicando los sondeos de captación y los tres grupos de piezómetros de control (P-I, P-II y P-III).

S. Joreto
 A. Pulido-Bosch
 F. Sánchez-Martos
 I. Francés
 J. Gisbert

Grupo de Investigación Recursos
 Hídricos y Geología Ambiental
 P. Engersgaard
 UNIVERSIDAD DE COPENHAGUE
 GEOLOGICAL INSTITUTE
 COPENHAGEN K. (DINAMARCA)

El comportamiento de los acuíferos costeros sometidos a explotación está muy estudiado. Lo que aún no está del todo evaluado es el comportamiento de un acuífero costero sometido a explotación, de agua salada. La proliferación, en los últimos años, de plantas desaladoras a lo largo del levante español, más las que aún están por construirse y/o proyectarse, nos sugiere prestar una mayor atención a los procesos asociados a esta inusual alteración de los sistemas costeros. La medición periódica de la temperatura y la conductividad de las aguas de pozos de observación totalmente ranurados, y el seguimiento de los niveles, temperatura y conductividad en continuo en una red de pozos convenientemente ranurados en cada uno de las franjas de agua (dulce, interfase y salada) ha permitido evaluar el equilibrio entre el agua dulce y salada en un estado pseudo-natural del acuífero. La reciente puesta en marcha parcial de la planta desaladora de la ciudad de Almería está permitiendo evaluar la respuesta inmediata del acuífero a la extracción intensa de agua salada, así como observar la respuesta del contacto agua dulce-agua salada que se convierte en una superficie casi neta y se hace más profunda. La evolución espacio-temporal de estos parámetros será determinante para formular hipótesis que permitan entender el comportamiento de la interfase en esas condiciones inéditas a largo plazo.

The behaviour of coastal aquifers that are subject to abstraction is well-studied. What is not yet assessed is the behaviour of coastal aquifers subject to seawater abstractions. The proliferation in recent years of desalination plants along the southeastern Spanish coast, in addition to the plants yet to be planned and/or constructed, has led us to focus on the processes associated with this unusual disturbance of the coastal systems. The pseudo-natural equilibrium in the aquifer between the fresh and the saltwater was established by means of periodic measurements of water temperature and conductivity in observation wells that are slotted over the whole water column, and continuous monitoring of water level, temperature and conductivity over a network of boreholes that are slotted over the lengths corresponding to each of the water levels (fresh, interface and salt). The recent partial-commissioning of the desalination plant serving the city of Almería has also enabled assessment of the immediate response of the aquifer to intensive abstraction of seawater, as well as observation of the response of the fresh water-salt water contact, which is becoming deeper and very well-defined. The spatio-temporal evolution of these parameters will be crucial in formulating a hypothesis to understand the behaviour of the interface under these unprecedented conditions.

Introducción

La planta desaladora de la ciudad de Almería está situada en la desembocadura del delta del río Andarax en su margen izquierda (Fig. 1) sobre el acuífero detrítico del mismo nombre (Sánchez Martos *et al.*, 2002). Los materiales acuíferos en el delta corresponden a formaciones de clara influencia marina, en continuidad lateral con los materiales cuaternarios-aluviales, caracterizado por la sucesión y alternancia de arenas, gravas y lutitas (Sánchez Martos, 1997).

La finalización de las obras de la planta desaladora de la ciudad de Almería, en el año 2000, supuso un alivio para los sobreexplotados acuíferos del Campo de Dalías que tradicionalmente abastecían a la ciudad y a su entorno, ya que tiene una capacidad de 4.000 m³/h, equivalente a una demanda en continuo de más de 1.100 l/s (Pulido-Bosch *et al.*, 2004). A pesar de que la planta, los sondeos de explotación y los sistemas de seguimiento y control estaban totalmente terminados, la planta no se puso en marcha hasta finales de 2006. Toda la información, desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, derivada de la construcción de los 19 sondeos de explotación (aunque sólo 14 de ellos se encuentran instalados para su uso) así como de los 12 piezómetros que constituyen el sistema de observación y control del acuífero (Fig. 1),



Figura 3a). Testificando el pozo B_320.

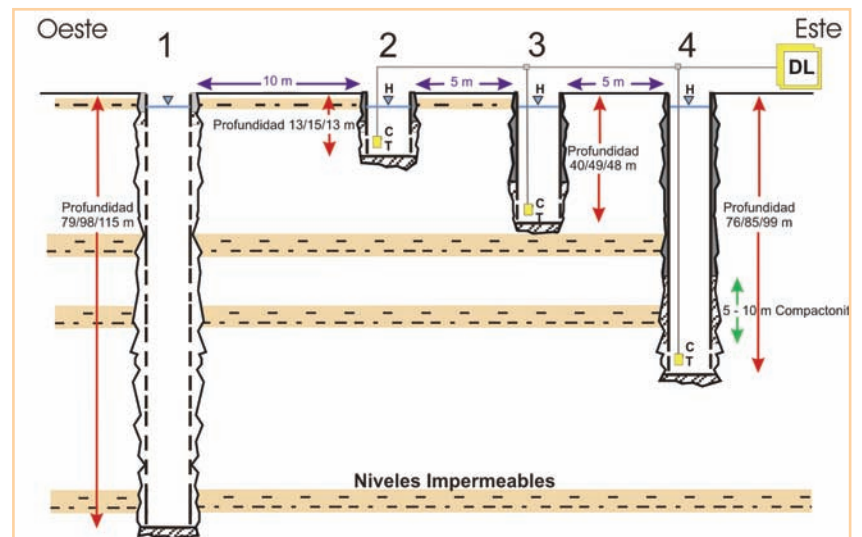


Figura 3b). Esquema de los enjambres de piezómetros y los sensores de medida en continuo.

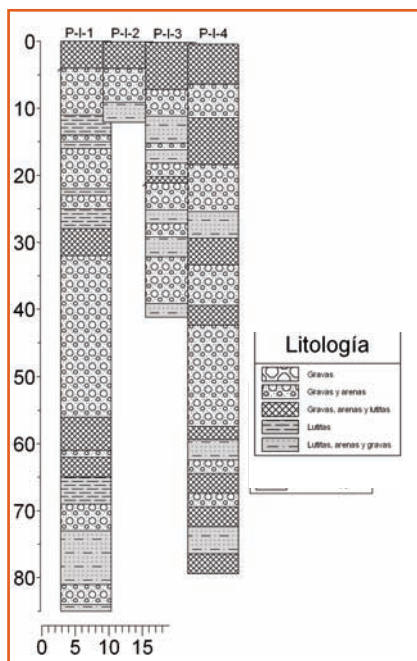


Figura 2. Litología del grupo de piezómetros P1.

proporcionaron datos suficientes como para caracterizar en detalle este heterogéneo y complejo sistema acuífero. Los detalles de construcción de los mismos han sido ya expuestos con anterioridad por otros autores (Gisbert *et al.*, 2002).

La inactividad de la planta durante todos estos años ha hecho posible conocer el acuífero en un estado no influenciado, así como evaluar su respuesta ante el inicio de los bombeos esporádicos de agua salada que tuvieron lugar durante las tareas de limpieza y puesta a punto de la planta en el año 2004 (Jorreto, 2006). Finalmente, el bombeo casi continuo desde su puesta en marcha está permitiendo realizar un seguimiento del estado influenciado del acuífero a

largo plazo completando así la observación del sistema en todas las situaciones posibles.

El objetivo principal de este trabajo es describir, desde un punto de vista cualitativo, la dinámica de la interfase de este acuífero detrítico costero sometido a grandes extracciones de agua salada como consecuencia de la puesta en marcha de la planta desaladora, abastecida de agua de mar a través de sondeos.

Métodos

La metodología aplicada para alcanzar los objetivos propuestos se basa en el análisis de la conductividad eléctrica del agua obtenida a partir de la testificación geofísica en sondeos

totalmente ranurados en profundidad y de las evoluciones temporales registradas en piezómetros ranurados a distinta profundidad. Las testificaciones de conductividad eléctrica del agua se llevan a cabo en los piezómetros 1 y los registros puntuales en continuo en los piezómetros 2, 3 y 4 (figura 3b). La profundidad de los filtros y los sensores coinciden con las zonas de agua dulce, interfase y agua salada en cada uno de los enjambres, aumentando conforme nos alejamos de la costa.

El equipo de testificación empleado y sus características están detalladamente explicados en *Jorreto et al.*, (2005). En cada uno de los tres enjambres, hay instalada una estación Meteodata/Hydrodata serie 1256C, con software de comunicación y almacenamiento de datos a intervalos de 10 minutos. Los tipos de sensores así como su rango y precisión se muestran en la tabla 1. En la tabla 2 se muestra un resumen de su localización.

Resultados y discusión

Registros verticales de conductividad eléctrica

Para el estudio de los perfiles de conductividad eléctrica se han considerado los tres piezómetros totalmente ranurados junto al sondeo situado en el lecho del río a tan sólo 900 metros de la desembocadura (Fig. 1). Se trata de un sondeo de investigación de 132 m de profundidad, recientemente perforado, igualmente ranurado en todos los tramos filtrantes. Los datos obtenidos de las testificaciones han sido tratados e interpolados y se muestran en las figuras 4 y 5. En ellas se representan la distribución de conductividad eléctrica en el acuífero con y sin bombeos de agua de mar por parte de la planta desaladora, es decir, en estado natural e influenciado. En la figura 4 se puede ver la distribución de conductividades en junio de 2006, antes de que comenzara a funcionar la planta y

en la figura 5 (mayo de 2007), con la planta en funcionamiento y bombeando en torno a 1400 m³/h de agua de mar. El efecto de este bombeo provoca el descenso de la interfase en el área más cercana a la costa, lo que se refleja por una disminución de la conductividad eléctrica en el perfil, especialmente en los tres piezómetros de control. Esta influencia afecta, con menos intensidad, incluso al sondeo B-320 que esta situado en el cauce del río Andarax, a unos 300 metros de la costa.

Evolución temporal de nivel piezométrico y la conductividad eléctrica

El almacenamiento de datos en continuo, y en intervalos cortos de tiempo, permite observar el comportamiento del acuífero a diferentes escalas temporales. Por ejemplo, en un análisis detallado, intervalo de 48 horas y en estado natural, se observa la oscilación periódica de niveles como consecuencia de las mareas, que se repite con carácter cíclico. La mayor oscilación se observa en P-I, donde alcanza 16 cm, y se atenúa a medida que nos alejamos de la costa (Fig. 6).

De los datos representados cabe destacar la casi despreciable oscilación en los piezómetros ranurados en el tramo dulce (P-I-2 y P-II-2), cuyos niveles oscilan entre 3 y 5 cm. En el resto, la oscilación varía entre 16 y 9 cm en P-I y P-III respectivamente. Esta fluctuación se repite con carácter cíclico, coincidiendo con el tipo de mareas semi-diurnas que caracteriza a la bahía de Almería, con dos mareas altas y dos mareas bajas, cada una de amplitud diferente (*Guhl et al.*, 2003).

En un análisis de los datos a mayor escala temporal puede verse la evolución de las medias diarias de nivel piezométrico y conductividad eléctrica. En la figura 7 se muestra la evolución desde septiembre a diciembre de 2006, coincidiendo con los primeros 4 meses de funcionamiento de la planta. Durante este período la planta bombea un caudal continuo cercano a 1.400 m³/h mediante 5 sondeos que van alternando cada 3 ó 4 semanas. A primera vista lo más destacable en esta figura es el descenso brusco

Tipo	Parámetro	Rango	Resolución	Precisión	Intervalo de medida
1830 Series	Nivel	0 – 10 m	0,01	± 0,1%	10 min
CT-10SE7INOX	Temperatura	0 – 50°C	0,10	0,15 °C	10 min
CT-10SE7INOX	Conductividad	0 - 70 mS/cm	0,10	5 %	10 min

Tabla 1. Características de los sensores de nivel, temperatura y conductividad eléctrica del agua.

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 y conductividad eléctrica.

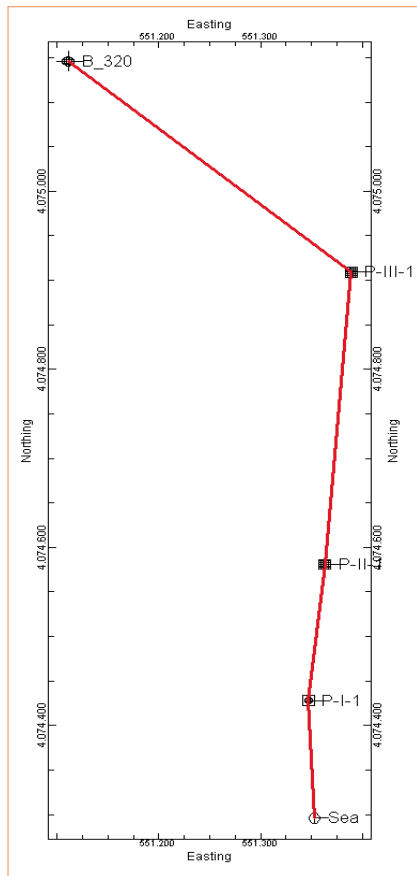
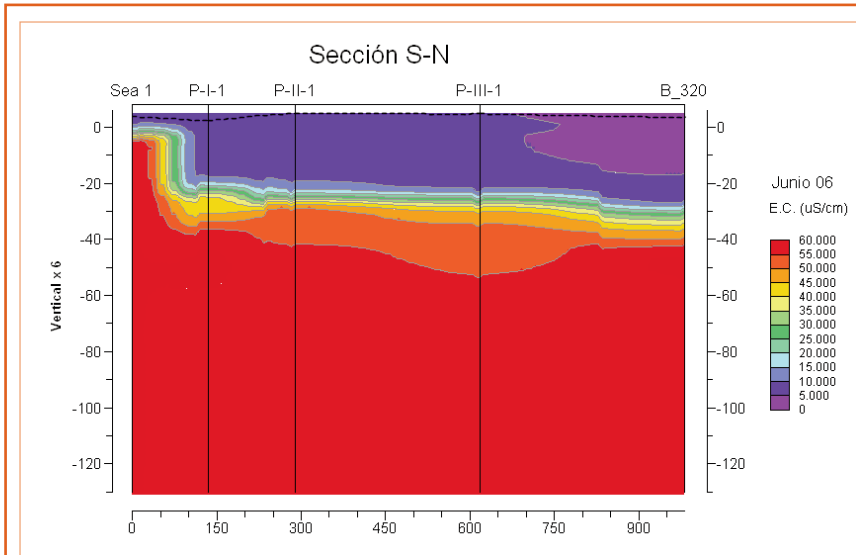


Figura 4. Perfil de conductividad eléctrica en el delta del Andarax en estado natural, junio de 2006, sin bombeos por parte de la planta desaladora. En el cuadro de la izquierda se representa en planta los piezómetros utilizados para el perfil.

que pasa de medir 22,4 mS/cm en septiembre a 12 mS/cm en diciembre, como consecuencia del descenso de la interfase agua dulce agua de mar. Esta tendencia se repite, en líneas generales, en el resto de enjambres. Aunque un análisis más detallado de los datos en cada uno de ellos, que no será discutido en este trabajo, muestra ciertas diferencias, condicionadas, principalmente, por la distancia que los separa de la costa y de los sondeos de captación, que durante este periodo de pruebas cambia periódicamente.

Igualmente, se aprecian ligeras subidas o bajadas de niveles cuando se producen cambios en las condiciones de explotación. Así, a finales de octubre, el descenso registrado se debe a un aumento del caudal bombeado, que pasa de los habituales 1.400 m³/h a 1.533 m³/h, mientras que el ascenso 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.

Considerando conjuntamente los datos obtenidos con el equipo de testificación y la consiguiente realización del perfil de conductividad eléctrica junto con las medidas en continuo obtenidas en los piezómetros ranurados a diferente profundidad, se constata que se produce un descenso muy brusco y rápido del contacto agua

de niveles en P-II-3 y P-II-4 tras la puesta en marcha, el 25 de septiembre, que descienden 0,75 m en tan sólo 24 horas. En P-II-4, después de 4 meses ha descendido casi 1 m (0,96 m). En cambio, el nivel en P-II-2 desciende de manera más lenta y menos drástica (0.39 m después del primer mes de funcionamiento), puesto que representa el nivel del tramo más superficial del acuífero, donde la influencia del bombeo de agua de mar es menor. También hay que reseñar el descenso progresivo, a lo largo del tiempo, de la conductividad eléctrica en P-II-3, ranurado en la interfase,

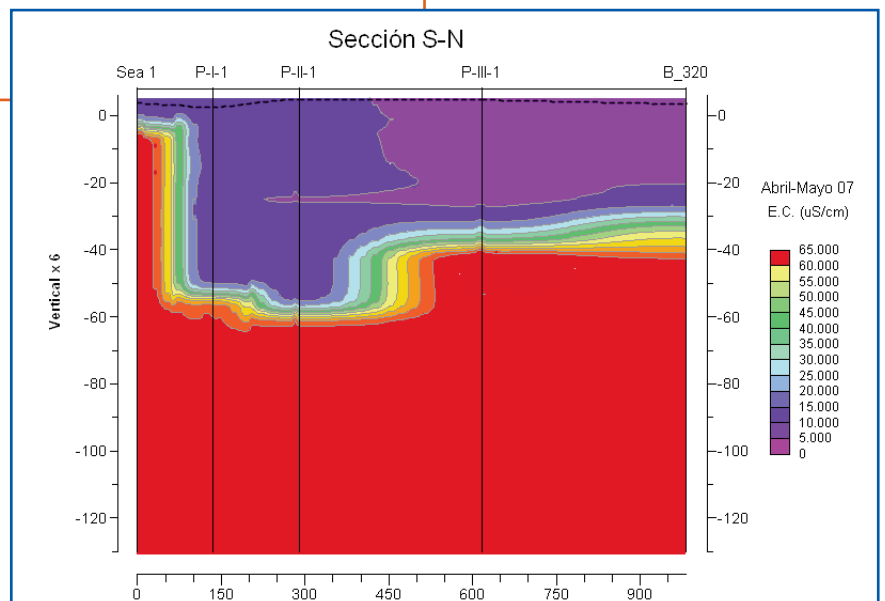


Figura 5. Perfil de conductividad eléctrica en el delta cuando la planta desaladora bombea 1.400 m³/h de agua de mar.

dulce-agua salada cuando se bombea de forma intensiva. Este contacto se estrecha en el área próxima a los sondeos de explotación, cerca de los P-I y P-II (Fig. 5), donde desciende más de 20 m. Esto queda confirmado, por las medidas de conductividad eléctrica registradas en los sensores instalados en los piezómetros P-I-3 y P-II-3, que poseen el tramo ranurado para caracterizar la interfase y donde se producen los mayores descensos en los valores de conductividad eléctrica y de nivel piezométrico (Fig. 7).

Consideraciones finales

Los registros de conductividad eléctrica realizados en los piezómetros totalmente ranurados, estado natural e influenciado, han permitido reconocer la distribución vertical del agua salada en el acuífero detrítico del delta del río Andarax bajo distintas situaciones de explotación de la planta desaladora, así como la localización y amplitud exactas de la interfase. Se constata que se produce un descenso muy brusco y rápido del contacto agua dulce-agua salada cuando se bombea de forma intensiva. Este contacto se estrecha en el área próxima a los sondeos de explotación, cerca de los piezómetros P-I y P-II, donde desciende más de 20 m.

En definitiva, el control en continuo y en intervalos pequeños de tiempo, a lo largo del eje perpendicular a la línea de costa, proporciona una herramienta ideal de observación de los acuíferos costeros, sometido a grandes cambios de explotación en poco tiempo y permite apreciar cambios puntuales en el acuífero en respuesta a un estímulo intenso, como es el inicio o cese de los bombeos. Este detallado sistema de observación y control, donde se registran tanto la componente espacial como temporal de nivel, y conductividad eléctrica, proporciona los datos necesarios para poder evaluar, desde un punto de vista cuantitativo, el equilibrio entre el agua dulce y salada, en un escenario tan atípico como este, sometido a grandes extracciones de agua salada.

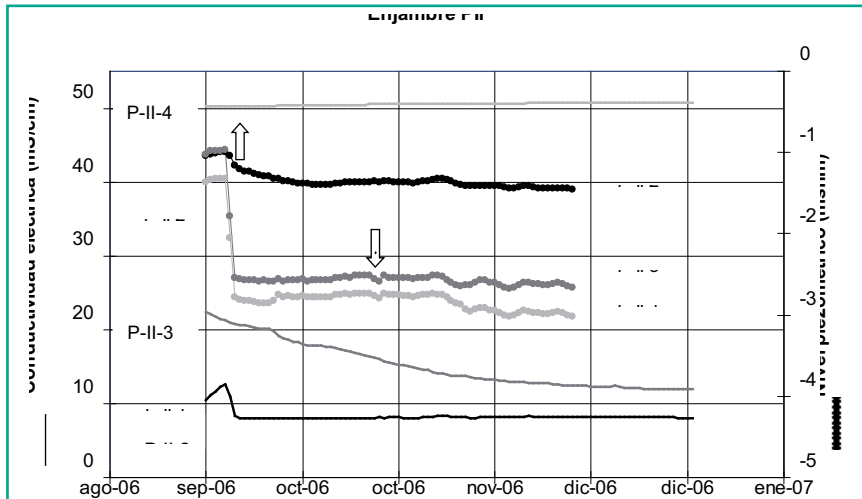


Figura 7. Evolución de nivel piezométrico y conductividad eléctrica de los piezómetros puntuales del enjambre P-II.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Proyecto ALERT (Contrato No GOCE-CT-2004-505329) financiado por la Unión Europea. Agradecemos la colaboración de los técnicos de la UTE Pridesa-Abengoa, encargada de la gestión de la Planta Desaladora, por facilitar en todo momento el acceso a las instalaciones y el suministro de datos técnicos requeridos.

Referencias

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: 543-555.

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. 2006 Control de la intrusión marina en el delta del río Andarax. In: *El agua y el medio ambiente*. Pulido-Bosch, A. y Molina Sánchez, L (Eds): 331-340.

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. *Las aguas subterráneas en los países mediterráneos*. IGME. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas. 17: 321-328.

Pulido-Bosch, A., Pulido-Leboeuf, P. y Gisbert, J. 2004. Pumping seawater from coastal aquifers for supplying desalination plants. *Geologica Acta*, 2(2): 97-107.

Sánchez Martos, F., 1997. *Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)*. Tesis Doctoral Universidad de Granada, 278 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: *Acuíferos costeros y Desaladoras*. Pulido Bosch, A., Vallejos Izquierdo, A., Pulido Leboeuf, P. A., (Eds.). pp: 169-184.

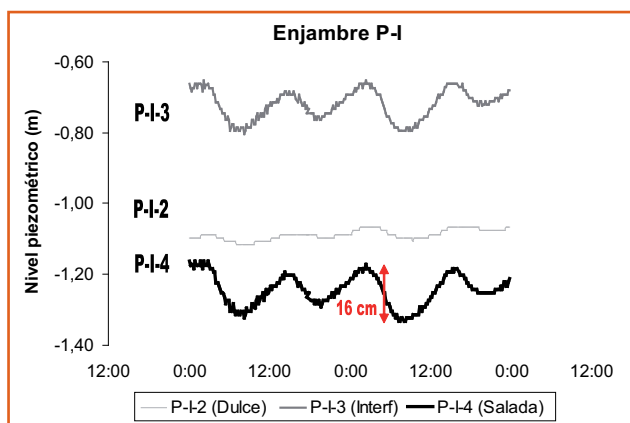


Fig. 6. Fluctuación de niveles piezométricos (m.s.n.m.) durante 48 horas en estado natural (10 y 11 de junio de 2006) en P-I y P-III.