

Estudio de la intrusión marina en el acuífero costero de río Verde de Almuñécar mediante registros de conductividad eléctrica del agua en piezómetros

Resumen

Abstract

- 1. *Introducción***
- 2. *Antecedentes***
- 3. *Características generales del acuífero aluvial del río Verde de Almuñécar***
- 4. *Precipitaciones durante el período de estudio***
- 5. *Métodos utilizados para la realización de este trabajo***
- 6. *Evolución de los niveles freáticos***
- 7. *Registros de conductividad***
 - 7.1. *Sector de la desembocadura. Piezómetro 7. (Fig. 4)***
 - 7.2. *Sector central de la vega. Piezómetro 14***
 - 7.3. *Sector norte de la vega. Piezómetros 17, 19 (Fig. 4) y 21***
 - 7.4. *Extremo septentrional de la vega. Piezómetro 24***
 - 7.5. *Acuífero aluvial, aguas arriba de la vega***
- 8. *Evolución de la intrusión marina***
- 9. *Conclusiones***
- 10. *Referencias***

Estudio de la intrusión marina en el acuífero costero del río Verde de Almuñécar mediante registros de conductividad eléctrica del agua en piezómetros

Carrasco Cantos, F. ⁽¹⁾, Vadillo Pérez, I. ⁽¹⁾, Andreo Navarro, B. ⁽¹⁾,
Benavente Herrera, J. ⁽²⁾, Santos-Olmo, A. ⁽³⁾

RESUMEN

Los registros de conductividad eléctrica del agua en los piezómetros del acuífero aluvial del río Verde ponen de manifiesto la existencia, en épocas de estiaje, de un importante proceso de intrusión marina que afecta a amplios sectores del acuífero. En situaciones de recarga, existe un flujo subterráneo con gradientes hacia el mar, tanto más elevado cuanto mayor es la magnitud de la recarga y, en estas circunstancias, el agua infiltrada (de baja mineralización) empuja hacia el mar al agua salada previamente almacenada en el acuífero.

ABSTRACT

The water electrical conductivity measurements in piezometers of the Rio Verde aquifer show a very important process of sea-water intrusion during the dry periods, that affect a wide extension all over the aquifer. During the recharge, the low mineralization groundwater with gradients to the sea, push the salt water stored in the aquifer, towards the sea.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo forma parte del "Estudio hidrogeológico de recursos de agua subterráneas y superficiales de los ríos Verde y Seco (Granada)" realizado por la Confederación Hidrográfica del Sur (1998) en el que se ha efectuado un detallado estudio de la interfase agua dulce-salada en el sector costero del acuífero aluvial del río Verde de Almuñécar.

2. ANTECEDENTES

Las primeras investigaciones hidrogeológicas en este acuífero se realizaron en la década de los años 70, época en la que el IGME efectuó el "Proyecto de investigación de aguas subterráneas" (PIAS). Los resultados de los trabajos de este Organismo han dado lugar a diversas publicaciones entre ellas IGME (1977,78,81 y 87) e ITGE (1992). Esta área ha sido objeto también de numerosos estudios por parte de investigadores de la Universidad de Granada, entre ellos la tesis doctoral de J. Benavente (1986).

En el año 1983 comenzaron a ser patentes los síntomas de sobreexplotación en el acuífero aluvial del río Verde en relación con la transformación agraria del valle de este río (Benavente y Fernández Rubio, 1983). Estos síntomas se manifestaron en la salinización de captaciones por intrusión marina que afectaba a los sondeos para el abastecimiento de Almuñécar

(Benavente et al., 1984 y Fernández Rubio et al., 1986). Nuevos datos sobre la intrusión marina y las posibles medidas tendentes a paliarla se exponen en Fernández Rubio (1988).

Para el control de los niveles y de las características físico-químicas del agua en el acuífero aluvial, en el año 1984 la Comisaría de Aguas del Sur realizó una red piezométrica que se ha estado controlando hasta la actualidad y que ha servido de base para hacer las medidas analizadas en este estudio.

Calvache (1991) en su tesis doctoral elaboró un modelo matemático del flujo en el acuífero aluvial así como de la geometría y situación de la zona de mezcla agua dulce-agua salada. Sus resultados han sido objeto de diferentes publicaciones (Calvache y Pulido, 1991a, 1991b).

La relación entre la posible construcción de un embalse en la cabecera del río Verde (presa de Otívar) y la evolución del acuífero aluvial aguas abajo, se contempla en Benavente et al. (1995).

Por último la cátedra de Geofísica Aplicada de la ETS de Ingenieros de Minas de Madrid, en colaboración con el ITGE ha realizado un control de la intrusión marina en este acuífero mediante sensores de conductividad y temperatura en los piezómetros de la CASE. Un resumen de estas investigaciones aparece en Díaz Curiel et al., (1995).

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACUÍFERO ALUVIAL DEL RÍO VERDE DE ALMUÑÉCAR

El acuífero aluvial del río Verde tiene una extensión de unos 3,5 km²; en él se pueden diferenciar dos secto-

⁽¹⁾ Departamento de Geología. Fac. de Ciencias. Campus de Teatinos. 29071, Málaga.

⁽²⁾ Instituto del Agua. C/ Rector López de Argüeta s/n. 18071, Granada.

⁽³⁾ Confederación Hidrográfica del Sur. Paseo de Reding 20. 29071, Málaga.

res, un sector alto que se desarrolla entre las cotas 130 y 40 msnm en el que el acuífero es estrecho y alargado y un sector bajo, la vega de Almuñécar, entre la cota 40 msnm y el mar, en el que el acuífero presenta una anchura de hasta 1 km, que se reduce a la mitad en la desembocadura.

Presenta un recubrimiento superficial limoso con abundante materia vegetal, de un espesor comprendido entre 0 y 10 m. Debajo se desarrolla una capa formada por materiales detríticos medios-grosos que en sectores próximos a la costa parece dividirse en dos niveles separados por horizontes con predominio de fracciones finas a muy finas. Existen importantes variaciones laterales en los niveles de gravas, arenas y limos, los primeros suelen aparecer como paleocanales.

El sustrato está constituido por un potente conjunto de naturaleza metapelítica (esquistos y cuarcitas) pertenecientes al complejo Alpujárride de la Cordillera Bética. Se encuentra afectado por fracturas que condicionan la dirección del valle del río. En el sector de la Vega, el sustrato presenta una profundidad entre 10 y 70 metros, los mayores valores se encuentran en el borde costero. En la parte septentrional de la vega el sustrato impermeable intersecta con la cota cero (nivel del mar) lo que es de gran interés para delimitar la máxima penetración posible de la interfase salina.

Existen numerosas captaciones, aunque en la actualidad muchas de ellas, principalmente las situadas en la vega, funcionan de forma esporádica dependiendo de la composición química del agua. El volumen anual del agua bombeada, variable según la pluviometría del año considerado, está comprendido entre 7 y 12 hm³. Este agua es utilizada para el regadío de la vega y de los numerosos bancales realizados en las laderas adyacentes y para abastecimiento urbano.

Las aguas del acuífero aluvial presentan una salinidad comprendida generalmente entre 500 y 900 mg/l. Sus proporciones iónicas son similares a las del agua del río que constituye su principal fuente de recarga. Las repetidas situaciones de inversión del gradiente hidráulico y los consiguientes procesos de intrusión

marina han supuesto el incremento de cloruros, de sodio y de la mineralización total en el sector de la vega. El factor limitante del uso del agua bombeada del acuífero es el deterioro de la calidad química. Existen importantes variaciones en la salinidad de las aguas subterráneas afectadas en mayor o menor grado por la intrusión marina y por el proceso opuesto de extrusión salina originados por la relación entre la recarga y los bombeos.

4. PRECIPITACIONES DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO

La precipitación media anual (años 1954/55 a 1996/97) en la estación pluviométrica de Cázulas (sector medio de la cuenca) es de 708 mm (Fig. 1A).

El estudio se ha desarrollado desde el mes de mayo de 1995 hasta el mes abril de 1997. En este tiempo se pueden distinguir dos periodos completamente diferentes (Fig.1B), el primero de mayo a noviembre de 1995, corresponde a los últimos meses de una prolongada sequía y el segundo a un periodo de importantes precipitaciones, en el que a su vez se pueden diferenciar tres episodios lluviosos, el primero registrado en los meses de noviembre, diciembre de 1995 y enero de 1996 con un total de 750 mm, el segundo registrado en mayo de 1996 con 240 mm y el tercero entre octubre de 1996 y enero de 1997 con un total de 1074 mm.

5. MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO

Entre los meses de mayo de 1995 y abril de 1997 se han realizado 18 campañas de registros de la conductividad eléctrica del agua (C.E.), expresada a 20 °C, en la vertical de catorce piezómetros (Fig. 2). Estos registros se han efectuado con un conductivímetro WTW, provisto de 100 m de cable.

Posteriormente se han realizado los gráficos en los que se representan las variaciones de la conductividad con la profundidad en cada piezómetro, perfiles y mapas de isoconductividades.

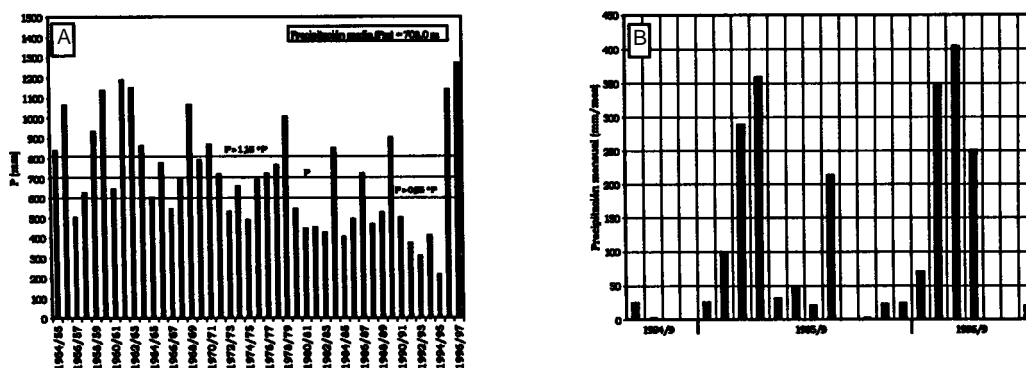


Figura 1. Precipitación media anual (A) del periodo histórico 1954/55-1996-97 y del periodo de estudio (B) Mayo 1995 - Abril 1997.



Figura 2.- Situación de los piezómetros de control en el acuífero del Río Verde.

6. EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS

Como consecuencia de la distribución de las precipitaciones durante el periodo de estudio se distinguen dos situaciones hidrodinámicas, una de estiaje (mayo a diciembre de 1995) correspondiente al final de una prolongada época de sequía y otra de aguas altas (diciembre de 1995-abril de 1997).

Durante el periodo de estiaje, el nivel piezométrico en la casi totalidad de la vega de Almuñécar se encontraba a cotas negativas, con las líneas isopiezas en forma de elipse, cuyo eje principal tiene dirección N-S y con la existencia de conoides de depresión piezométrica en los sectores de los principales puntos de bombeo (Fig. 3A).

Durante el periodo de aguas altas se origina una importante recuperación piezométrica de hasta 20 metros, como respuesta a las lluvias. Las líneas isopiezas ponen de manifiesto la existencia de una descarga de agua subterránea al mar. El río produce una alimentación al acuífero puesta de manifiesto por una líneas de flujo radiales y divergentes, con excepción del sector próximo a la desembocadura donde algunos sondeos eran surgentes y el acuífero alimentaba al río (Fig. 3B)

7. REGISTROS DE CONDUCTIVIDAD

En los registros efectuados se distinguen claramente las dos situaciones hidrodinámicas extremas a las que se ha visto sometido el acuífero. Para su análisis se consideran varios sectores.

7.1 Sector de la desembocadura. Piezómetro 7 (Fig. 4).

En la primera campaña (situación de sequía) existe una primera capa de 15 m de espesor con una C.E. del orden de 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspondiente al agua superficial del acuífero aluvial; entre 15 y 35 m existe una capa con C.E. creciente a lo largo de este periodo con máximos entre 13.000 y 30.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspondiente a una zona de mezcla y por debajo de los 35 m el agua es prácticamente marina con valores del orden de 45.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con posterioridad a las precipitaciones del primer episodio lluvioso (campaña 5), se produce una homogeneización en el agua de toda la vertical del piezómetro con valores muy elevados de C.E. (35.000-40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que debe corresponder al agua salada previamente almacenada en la zona inferior del acuífero aguas arriba de este sector y que ha sido empujada hacia la costa por el agua de recarga.

A partir de abril de 1996 (campañas 6 a 17) la C.E. es progresivamente menor a medida que la recarga va siendo efectiva y el agua salada es reemplazada por agua de menor salinidad, hasta llegar al final del periodo (campaña 18) a valores ligeramente superiores a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

7.2 Sector central de la vega. Piezómetro 14.

En situación de aguas bajas se observa una situación similar a la del sector anterior. Existe una capa superficial, de unos 20 m de espesor, de agua con valores de C.E. inferior a 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por debajo, hasta 34 m de profundidad, se desarrolla una zona de mezcla en la que hay un aumento progresivo de la C.E. hasta valores de 35.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y a mayor profundidad la C.E. es del orden de 40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo que denota la presencia de agua marina.

A partir de la campaña 5 (situación de recarga) se registra una gran disminución de la C.E. hasta valores de 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La principal diferencia con el sector de la desembocadura es que aquí no se detecta la salinización de toda la columna como respuesta a la primera recarga.

7.3 Sector norte de la vega. Piezómetros 17, 19 (Fig 4) y 21.

En el periodo de estiaje se diferencian dos capas, la superior, hasta 30-35 m de profundidad presenta una C.E. variable entre 2.000 y 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según los dis-

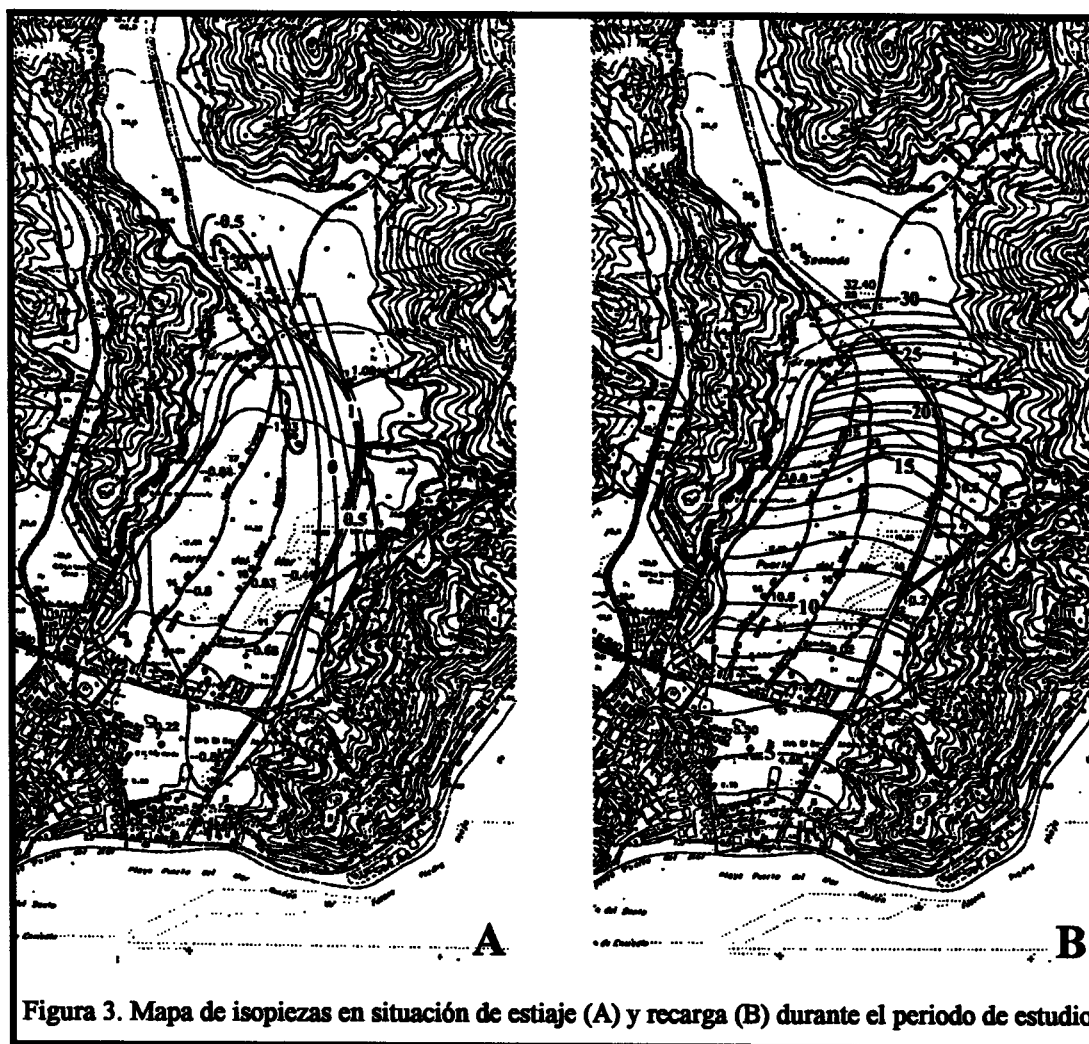


Figura 3. Mapa de isopiezas en situación de estiaje (A) y recarga (B) durante el periodo de estudio

tintos piezómetros y debajo de ella la C.E. aumenta hasta valores de 8.000 a 25.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en diferentes áreas, con los valores más altos en las zonas cercanas a los conoides de depresión producidos por los bombeos (piezómetro 19). A partir de la campaña 5 se produce también una rápida disminución de la C.E. para acabar el periodo de estudio con valores inferiores a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

7.4 Extremo septentrional de la vega. Piezómetro 24.

Durante el periodo de estiaje, en el que el agua se encontraba entre 30 y 50 m de profundidad la C.E. es alta, con valores próximos a 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al avanzar este periodo se diferencian dos niveles el superior con C.E. próxima a 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el inferior con valores de 13.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Durante la época de recarga la C.E. desciende a valores inferiores a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

7.5 Acuífero aluvial, aguas arriba de la vega.

En este sector el acuífero presenta en todo momento una baja salinidad debido a que el sustrato se encuentra por encima del nivel del mar y por ello no es posible su salinización por intrusión marina.

Durante el estiaje, el acuífero está casi desaturado, con una C.E. próxima a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en épocas de recarga, con un considerable aumento del nivel piezométrico, la C.E. desciende a valores de 600-700 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

8. EVOLUCIÓN DE LA INTRUSIÓN MARINA

En el periodo de estiaje existe una cuña de agua salada en la zona inferior del acuífero, con agua de más de 40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de C.E. Hay que tener en cuenta que el estudio comenzó al final de una prolongada sequía en la que la intrusión marina ya se había producido y que en dicha época los bombeos en este sector ya eran escasos debido a la alta salinidad del agua.

Al comienzo (Fig 5A) la cuña de agua salada penetra en el acuífero y existe un domo salino en su extremo septentrional, la superficie de esa cuña está inclinada hacia el mar, pero al avanzar el estiaje se horizontaliza e incluso al final del mismo esta superficie buza ligeramente hacia el continente, momento en el que la intrusión marina afecta plenamente a la vega y es además cuando comienza a aparecer otra pequeña

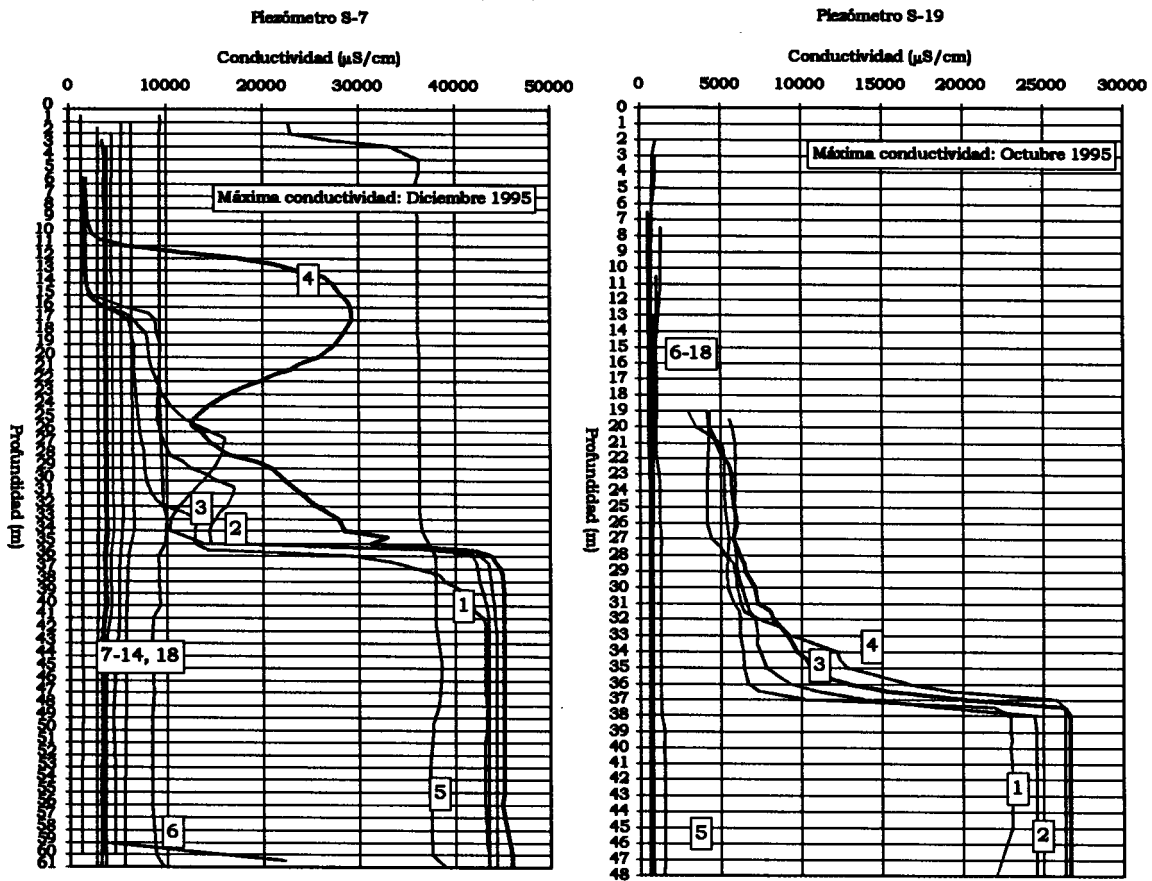


Figura 4. Registros de conductividad en la vertical de dos piezómetros de la red de control

cuña de agua salada afectando a niveles más superficiales del acuífero (Fig. 5B).

En los periodos de recarga se produce una homogeneización del agua en el acuífero; las líneas de isoconductividad se verticalizan (Fig. 5C) y se origina un desplazamiento progresivo del agua salada hacia el mar debido al empuje producido por el agua de menor salinidad. Después del primer episodio lluvioso, toda el agua salada se acumula en el sector de la desembocadura produciéndose un rápido lavado del acuífero que culmina con los bajos valores de C.E. medidos al final del periodo de estudio.

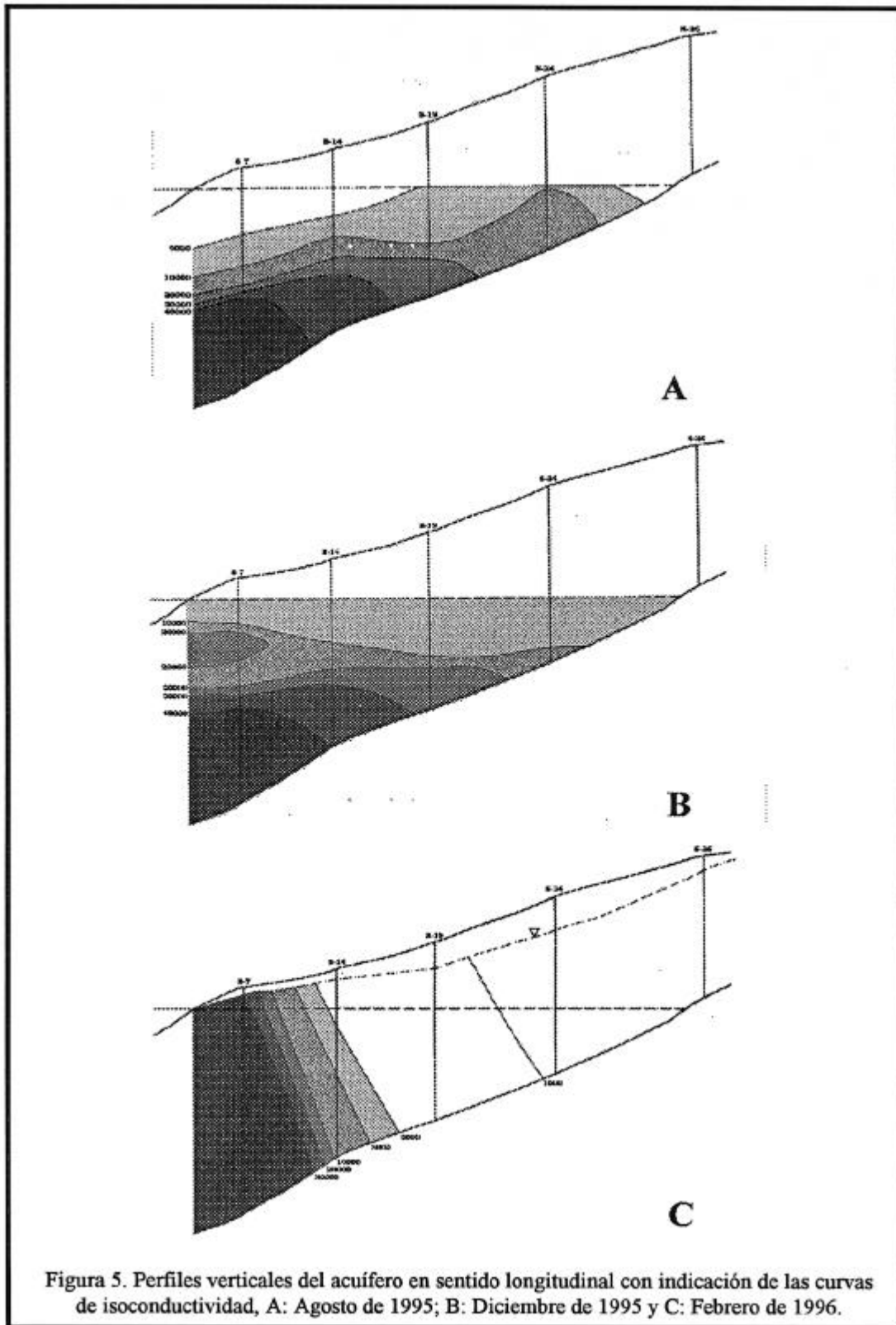
En los mapas de isoconductividades realizados a la cota 15 mbnm para el periodo de estiaje (Fig. 6A), las líneas de isoconductividad tienen forma elíptica convexa hacia el norte, lo que nos pone de manifiesto la salinización del acuífero por agua del mar. Estas líneas tienden a ser paralelas a los bordes del acuífero, originando núcleos de mayor conductividad en el entorno de los puntos de mayor bombeo (piezómetros 14 y 19). Las líneas de isoconductividad indican que el camino preferente de la salinización del acuífero corresponde a un eje de penetración coincidente aproximadamente con el camino de la vega segunda.

El efecto pistón ejercido por el agua de recarga, de mucha menor mineralización, se pone de manifiesto en los mapas de isoconductividades realizados a la cota 15 mbnm (Fig. 6B), en el que la convexidad de las líneas de isoconductividad cambia hacia el mar. La forma de estas curvas tiende a ser elíptica con valores más bajos en el núcleo, adaptándose a la traza del río que constituye la fuente principal de recarga del acuífero y también aparece como eje de mayor dilución el camino de la vega segunda.

9. CONCLUSIONES

Los registros de conductividad eléctrica del agua de los piezómetros del acuífero aluvial del río Verde ponen de manifiesto la existencia de un importante proceso de intrusión marina durante periodos de estiaje en la parte inferior del acuífero, pudiendo en caso de estiajes más extremos, producirse también a través de niveles más superiores. La intrusión afecta a amplios sectores del acuífero incrementándose en las zonas en las que se producen bombeos, aunque estos sean escasos debido a la imposibilidad de utilizar esta agua para riego de los cultivos existentes en la vega y laderas adyacentes.

A lo largo del estiaje la intrusión marina avanza en el



sentido longitudinal y vertical del acuífero. Esta intrusión no puede alcanzar los sectores situados más al Norte de la vega de Almuñécar debido a que el sustrato se encuentra por encima del nivel del mar.

En situaciones de recarga, existe un flujo subterráneo con gradientes hacia el mar, tanto más elevado cuanto mayor es la magnitud de la recarga y en estas circunstancias el agua infiltrada de baja mineralización empuja hacia el mar al agua salada previamente



almacenada en el acuífero. Este desplazamiento se produce por un flujo descendente que sigue la zona comprendida entre el camino de la vega segunda y el eje del río, el cual controla la recarga del acuífero.

10. REFERENCIAS

- BENAVENTE, J. (1986). **Las aguas subterráneas en la Costa del Sol de Granada**. Coedición: Univ. Granada-Diputación Prov. Granada. 336 pág.
- BENAVENTE, J. y FERNÁNDEZ-RUBIO, R. (1983). Impacto hidrológico de la transformación agraria en el valle de Almuñécar (Granada). **Actas II Reun. Nac. Geol. Amb. y Ord. Territ. (Lérida)**, t. 1: 32-50.
- BENAVENTE, J., FERNÁNDEZ-RUBIO, R. y JALON, M. (1984). Intrusión marina en el acuífero costero del río Verde (Granada). **Actas I Congreso Español de Geología (Segovia)**, v. 4: 75-86.
- BENAVENTE, J., CRUZ SANJULIAN, J.J. y PADILLA, F. (1995). **Impacto del embalse de Otívar en el acuífero del río Verde. Modelo de simulación**. Informe inédito para ALJAIMA, S.A.-CHSE.
- CALVACHE, M.L. (1991). **Simulación matemática del contacto agua dulce-agua salada en algunos acuíferos de la Costa del Sol**. Tesis Doctoral Univ. Granada. 317 pág.
- CALVACHE, M.L. y PULIDO, A. (1991a). Saltwater intrusion into a small coastal aquifer (río Verde, Almuñécar, S. Spain). **Journal of Hydrology**, 129: 195-213.
- CALVACHE, M.L. y PULIDO, A. (1991b). Sobre la metodología de simulación del contacto agua dulce-agua salada. **Actas III Simposio sobre el agua en Andalucía (Córdoba)**, v. 1: 301-312.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SUR (1998). Estudio hidrogeológico de recursos de agua subterráneas y superficiales de los ríos Verde y Seco (Granada).
- DÍAZ CURIEL, J., MARTÍN SÁNCHEZ, D., MALDONADO, A. y GÓMEZ MARTOS, M. (1995). Red de control c/T para el estudio de intrusión marina en Almuñécar (Granada). **Boletín Geol. Min.** 106-4: 358-372.
- FERNÁNDEZ RUBIO, R. (1988). Almuñécar-Intrusión salina. Soluciones a un problema. **La Intrusión en España: TIAC'88**

(Almuñécar): 427-438. Ed.: ETSIMM-IGME.
FERNÁNDEZ-RUBIO, R., JALÓN, M., BENAVENTE, J. y
FERNÁNDEZ-LORCA, S. (1986). Proceso de salinización-
desalinización en el acuífero costero del río Verde
(Almuñécar, Granada). **Actas II Simp. sobre el Agua en
Andalucía (Granada)**, v. 2: 303-314.

IGME (1977). **Investigación hidrogeológica de las cuencas
del sur de España (sector occidental)**. Informe inédito.

IGME (1978). **Evolución de niveles piezométricos en los sis-
temas acuíferos. Cuenca Sur. Anuario 1975**. Serv. Publ. Min.
Ind. Energ. 433 pág.

IGME (1981). **Investigación hidrogeológica de las cuencas
del sur de España (sector occidental)**. Colección informe.
Serv. Publ. Min. Ind. Energ. 78 pág.

IGME (1987). **Funcionamiento hidrogeológico y balances de
los acuíferos de Motril-Salobreña, Almuñécar y Gualchos**.
Varios informes inéditos.

ITGE (1992). **Acuífero costero de Almuñécar. Síntesis de tra-
bajos realizados, situación actual y perspectivas futuras**.
Informe técnico inédito.