

# Determinación de velocidades de flujo en acuíferos carbonatados alpujárrides mediante ensayos de dilución

Calculation of flow velocities in alpujarride carbonate aquifers using single borehole technics

J. Cardenal Escarcena (\*), S. García López (\*\*), J. Benavente Herrera (\*) y J. J. Cruz Sanjulián (\*).

(\*) Instituto del Agua-Universidad de Granada. c/Rector López Argüeta, s/n. 18071 Granada.

(\*\*) Dpto. Geodinámica-Universidad de Granada. Campus Fuentenueva, s/n. 18071 Granada.

## ABSTRACT

We have used the single borehole method for calculating the Darcy velocity in carbonate aquifers of diffuse flow system type. The tests have been based on the labelling of the whole water column in piezometers with a saline tracer (NaCl) and electrical conductivity profiles have been measured afterwards. The results were compared with those obtained with other technics (pumping and recovery tests). In some case important vertical descending flows were identified in recharge areas in very complex hydrogeological context.

**Key words:** single borehole technics, horizontal and vertical flows, alpujarride carbonate aquifers.

Geogaceta, 14 (1993), 3-5  
ISSN: 0213683X

## Introducción

Se han realizado cuatro ensayos de dilución en piezómetros perforados en materiales calizo-dolomíticos triásicos de la unidad de Lújar-Gádor (Complejo Alpujárride, Zonas Internas de la Cordillera Bética). Esta unidad ocupa la posición tectónica inferior de dicho complejo al S de Sierra Nevada. Su formación carbonatada —de espesor superior a los 1000 m— aflora extensamente en las sierras costeras de Lújar y Gádor, las cuales constituyen los acuíferos más

importantes del área. Estos acuíferos, en general, no presentan un funcionamiento típicamente kárstico. La descarga de las surgencias es muy regular, con gran inercia en su respuesta a la recarga por la precipitación. La abundancia de material dolomítico, con un gran desarrollo de la microfisuración, contribuye a este comportamiento.

Las experiencias se han llevado a cabo en dos sectores, ambos en relación con los principales cursos superficiales (figura 1): los bordes N y W del acuífero de la Sierra de Lújar (provincia de

Granada), en las proximidades del río Guadalfeo, y el acuífero de Turón-Peñarrodada (provincia de Almería), en el cañón del río Adra, aguas abajo de la presa de Benínar.

## Metodología

Para la realización de los ensayos se ha utilizado la técnica del pozo único (Baonza *et al.*, 1970), mediante el marcado de la columna piezométrica con una solución salina (100 g/l de NaCl) distribuida a lo largo del sondeo con ayuda de un tubo flexible. Posteriormente se han efectuado sucesivos perfiles de conductividad en cada piezómetro, con objeto de registrar la dilución del trazador, que depende de la velocidad del flujo subterráneo en el acuífero.

La velocidad de flujo viene dada por la expresión:

$$V_A = (1.8 \cdot d / \alpha t) \cdot \lg(C_1 / C_2) \quad (1)$$

Donde  $V_A$  es la velocidad de flujo (de Darcy);  $d$  es el diámetro del sondeo;  $\alpha$  es un coeficiente de corrección de la perturbación hidrodinámica ocasionada por el piezómetro (comprendido entre 1.5 y 2); y  $C_1$  y  $C_2$  son la concentración del trazador, en dos instantes separados un intervalo  $t$ .

Previamente a la inyección del trazador, fue registrada la conductividad natural de las aguas a lo largo de las perfo-

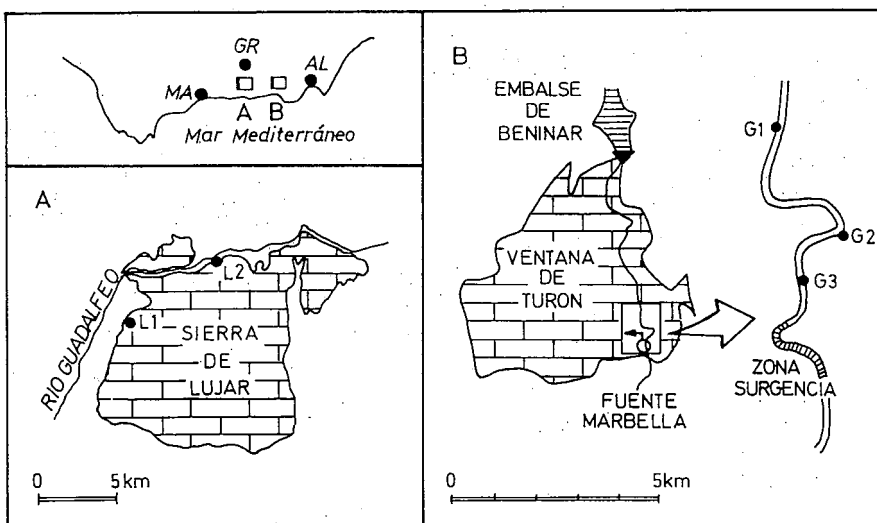


Fig. 1. — Localización geográfica y esquemas hidrogeológicos de los sectores estudiados. A: Acuífero de Sierra de Lújar. B: Acuífero de Turón-Peñarrodada.

Fig. 1. — Geographic location and hydrogeological sketches of the studied areas. A: Sierra de Lújar aquifer. B: Turón-Peñarrodada aquifer.

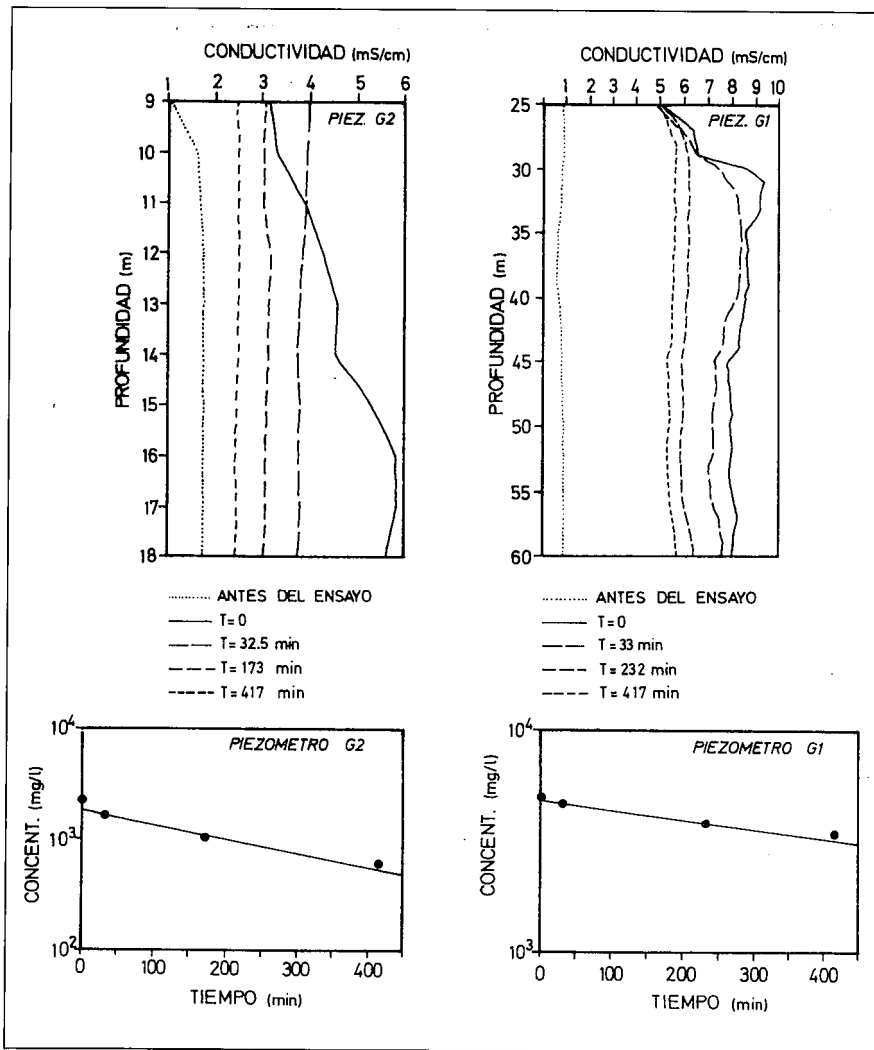


Fig. 2. — a) Evolución de la conductividad eléctrica en el tiempo a lo largo de los piezómetros G1 y G2. b) Representación del logaritmo de la concentración en función del tiempo.

Fig. 2. — a) Evolution of the electrical conductivity with time along the boreholes G1 and G2. b) Logarithm of concentration vs. time.

raciones, con objeto de tener en cuenta su salinidad inicial en la posterior interpretación. Los valores de conductividad han sido transformados en concentraciones de trazador empleando un factor de conversión comúnmente utilizado ( $0.74 \text{ mg}\cdot\text{cm}/\mu\text{S}$ ), y restando a la concentración resultante la concentración inicial previa a la inyección de la sal.

**Resultados y discusión**

Los piezómetros G1 y G2 se localizan aguas arriba de la zona de descarga del acuífero de Turón-Peñarrodada (Fuentes de Marbella, ver figura 1b). Las profundidades del nivel piezométrico son 21 y 8 m, y en ellos fueron marcados 35 y 10 m de columna de agua, respectivamente. Excepto en el registro

inicial ( $t=0$ ), realizado inmediatamente después del trazado y que presenta indicios de escasa mezcla del trazador especialmente en el tramo más superficial, los perfiles en ambos piezómetros son bastante regulares y muestran una velocidad horizontal de flujo relativamente uniforme en toda la columna (fig 2a).

La representación del logaritmo de la concentración (valores medios de toda la columna) frente al tiempo (fig 2b), proporciona una buena alineación de puntos, que permite calcular la velocidad del flujo subterráneo ( $V_A$ ) mediante la expresión (1). No se han observado efectos de retención del trazador en las paredes del sondeo que hubieran alterado la alineación de los puntos.

En el piezómetro G1, situado 1000 m al N del manantial, la velocidad obtenida es 4 cm/día, mientras que en el G2,

situado 550 m al NE del manantial, ésta ha resultado ser superior (12 cm/día). Esta diferencia de velocidad de flujo es atribuible, más que a un cambio de las características hidráulicas del material, al mayor gradiente hidráulico ( $i$ ) existente en el sector donde está situado el piezómetro G2 ( $5.2 \cdot 10^{-4}$ ), que el correspondiente al piezómetro G1 ( $2.6 \cdot 10^{-4}$ ), como consecuencia de la proximidad a la surgencia. Estos gradientes han sido estimados considerando un tercer piezómetro de referencia (G3, figura 1b) emplazado en las proximidades de la surgencia. A partir de los datos de velocidad de flujo y de los gradientes obtenidos, puede calcularse el valor de la permeabilidad ( $k$ ), dado que:  $k = V_A/i$ . Para el piezómetro G1 se obtiene un valor de permeabilidad de 160 m/día, mientras que para el G2 el valor resultante es algo superior, 220 m/día.

Los resultados obtenidos justifican la elevada trasmisividad (del orden de  $10^5 \text{ m}^2/\text{día}$ ) calculada en el acuífero de Turón-Peñarrodada mediante un ensayo de bombeo de gran caudal (García-López *et al.*, 1992), si se considera el importante espesor saturado de este acuífero (de varios centenares de metros), como sugiere el termalismo de sus aguas y los sondeos construídos, ninguno de los cuales ha alcanzado el sustrato impermeable.

Los piezómetros L1 y L2 se localizan en el acuífero de Sierra de Lújar. En el primero, situado aproximadamente 200 m por encima de la cota del río Guadalfeo, el nivel se encuentra a 60 m de profundidad. Por limitaciones del instrumental, sólo se han trazado los primeros 40 m de columna. Sin considerar la primera medida ( $t=0$ ), donde, al igual que se comentó anteriormente, hay evidencias de una distribución no homogénea del trazador, se pueden apreciar dos tramos de diferente comportamiento (figura 3). Los 15 primeros metros presentan una velocidad de flujo superior (3 cm/día) a la del tramo inferior (1.5 cm/día). Esta variación vertical de la velocidad es coherente con la heterogeneidad de la columna del sondeo, tanto por el diferente grado de brechificación según los tramos, como por la distinta litología de las rocas atravesadas (dolomías y, en menor medida, calizas y margocalizas).

Por último, el piezómetro L2, situado en las cercanías del río Guadalfeo en el sector de Orgiva, tiene 100 m de profundidad y el nivel de agua se encuentra a unos 4 m de la superficie. El trazado

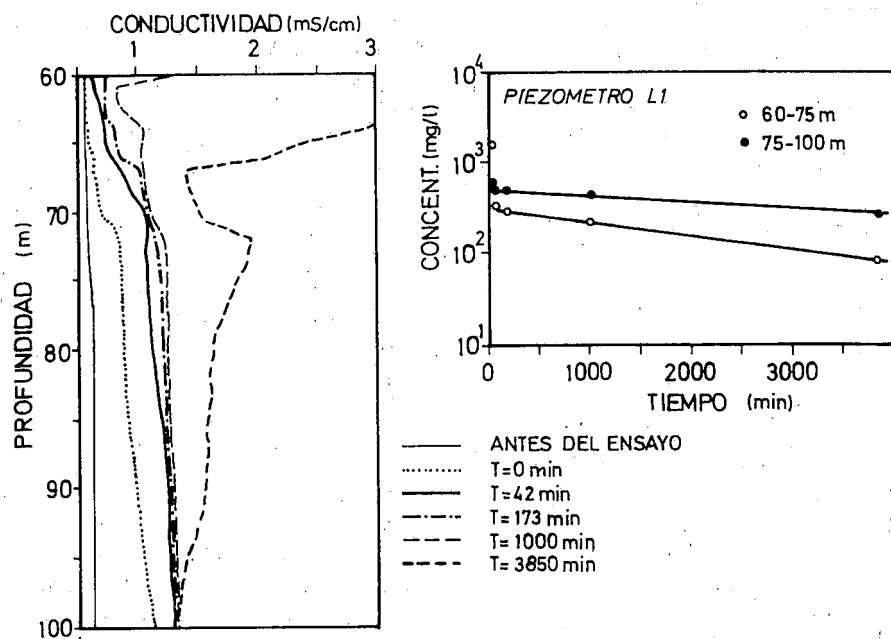


Fig. 3. — a) Evolución de la conductividad eléctrica en el tiempo a lo largo del piezómetro L1.  
b) Representación del logaritmo de la concentración en función del tiempo.

Fig. 3. — a) Evolution of the electrical conductivity with time along the borehole L1.  
b) Logarithm of concentration vs. time.

de la columna puso de manifiesto la existencia de un importante flujo vertical descendente que causó la rápida desaparición de la sal. La existencia de este flujo implica una recarga del acuífero carbonatado procedente del aluvial. Esta alimentación debe tener un carácter localmente restringido, dado que se han reconocido surgencias que drenan el acuífero carbonatado unos centenares de metros aguas arriba y abajo de este punto (Cardenal, 1991).

Para estimar la velocidad del flujo descendente por el interior del piezómetro, se inyectó cierta cantidad de trazador en la parte superior de éste y se registró la nube de paso a tres profundidades diferentes: 15, 50 y 90 m (fig 4). En el primer tramo, hasta los 15 m, se apreció una velocidad de unos 10 cm/s. En el tramo comprendido entre los 15 y 50 m la velocidad aumentó sensiblemente (superior a 1 m/s); además, se detectó una importante pérdida del trazador (70%), lo que implica una elevada permeabilidad del acuífero en ese tramo. Por el contrario, en el tramo inferior (50-90 m), la velocidad del flujo disminuyó a 8 cm/s, sin que se aprecia-

sen pérdidas significativas del trazador, lo que estaría de acuerdo con una menor permeabilidad en este tramo y la existencia de un nivel permeable al final del sondeo responsable de la desaparición casi total del trazador a los 20 minutos de iniciada la inyección.

### Conclusiones

Se ha puesto de manifiesto la utilidad del método para determinar velocidades del flujo subterráneo en materiales carbonatados de flujo difuso; se han obtenido velocidades comprendidas entre 1.5 y 12 cm/día. En el caso del acuífero de Turón-Peñarrodada, donde es conocido el gradiente hidráulico, se ha estimado un valor para la permeabilidad de 190 m/día, que justificaría las elevadas transmisividades detectadas por otras metodologías.

El ensayo de trazado también ha detectado la existencia de importantes flujos verticales descendentes en sectores del acuífero de Sierra de Lújar en íntima relación con el río Guadalfeo. Este aspecto resulta de especial interés dado

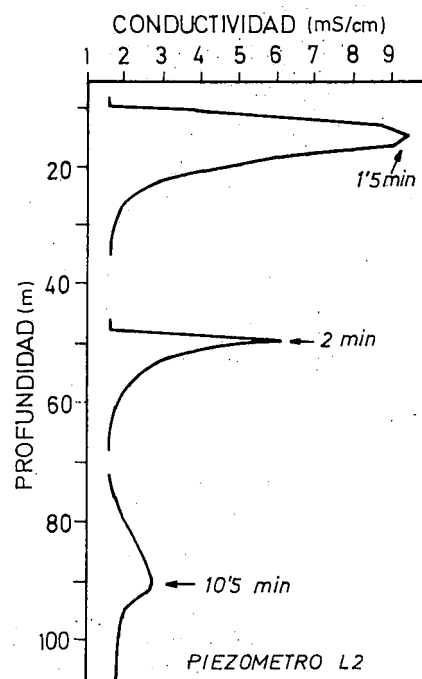


Fig. 4. — Nubes de paso del trazador a tres profundidades diferentes (15, 50 y 90 m) en el piezómetro L2. Se incluyen los tiempos de llegada del máximo de concentración.

Fig. 4. — Tracer clouds at three different depths (15, 50 and 90 m) in the borehole L2. Arrived times of the maximum concentration of tracer are included.

que, aguas abajo, estos mismos materiales van a ser inundados por el embalse de Rules, actualmente en proyecto. Además, estos nuevos datos matizan los estudios anteriores que consideraban este sector del acuífero como un único borde de descarga (Cardenal *et al.*, 1992), por lo que se debe suponer una situación más compleja, en la cual se alternen áreas de descarga y recarga en apenas 1 km en el límite N del acuífero.

### Referencias

- Baonza, E.; Plata, A. y Piles, E. (1970). Isotope Hydrogeology, (Proc. Symp. Viena), O.I.E.A. Viena (Austria) 695-711.
- Cardenal, J. (1991). Tesis de Licenciatura Univ. Granada. Inédita.
- Cardenal, J.; Benavente, J. y Cruz-Sanjulián, J.J. (1992). Geogaceta, 11, 59-60.
- García-López, S.; Carrasco, F.; Cruz-Sanjulián, J.J. y Fernández del Rfo, G. (1992). El Agua en Andalucía, Vol.I, 379-390.