

HIDRODINÁMICA DE LOS SISTEMAS GEOTERMALES DEL VALLE
DEL RÍO ALMANZORA (ALMERÍA)

A. Navarro Flores¹, M. Martín-Vallejo², L. García-Rosell³ y D. Colado Fernández³

¹ Dpto. Mecánica de Fluidos, U.P.C., C. Colón, 11, 08222 Terrassa (Barcelona)

² IACT-CSIC, Univ. Granada, Avda. Fuentermusa, S/N, 18002 Granada

³ Dpto. Edafología y Química Agrícola I.E.A.L. La Cañada de San Urbano S/N, 04120 Almería



7269
R- 7269

Donación
J. Rossell

IV SIAGA, Almería, 1996. I: 305-315



HIDRODINÁMICA DE LOS SISTEMAS GEOTERMALES DEL VALLE DEL RÍO ALMANZORA (ALMERÍA)

A. Navarro Flores¹, M. Martín-Vallejo², L. García-Rossell² y D. Collado Fernández³

¹ Dpto. Mecánica de Fluidos. U.P.C. C. Colón, 11, 08222 Terrassa (Barcelona).

² IACT-CSIC-Univ. Granada, Avda. Fuentenueva, S/N; 18002 Granada

³ Dpto. Edafología y Química Agrícola U.A.L. La Cañada de San Urbano S/N; 04120 Almería

RESUMEN.- El estudio de las características hidrogeoquímicas e isotópicas de las aguas termales de la cuenca media y baja del río Almanzora sugiere la existencia de varios sistemas hidrotermales alimentados por aguas meteóricas, y sometidos a temperaturas cercanas a los 90 °C en las zonas más profundas de los sistemas de flujo hidrogeológico.

El modelo conceptual planteado que explica el flujo de agua subterránea, así como el transporte de calor y masa en estos sistemas indica que las aguas geotermales se originan por la infiltración de agua meteórica en áreas de topografía elevada, circulando a través de la red de fracturación existente en los materiales del zócalo permotriásico y produciéndose una descarga natural ("hot springs") o a través de sondeos en las Depresiones Terciarias.

El resultado parece ser un sistema convectivo de circulación, de carácter complejo, pero que podría condicionar las características hidroquímicas de las aguas subterráneas, de modo que cuanto mayor es el tiempo de circulación y la profundidad alcanzada por el agua meteórica, mayor es la salinidad y el contenido metálico de las aguas.

Para evaluar la verosimilitud del modelo conceptual planteado se ha analizado la hidrodinámica de los sistemas geotermales mediante la simulación numérica de dichos sistemas, empleando para ello un modelo analítico simple de flujo en un sistema fisurado, y un modelo numérico de diferencias finitas que simula el flujo subterráneo y el transporte de calor en un medio tridimensional.

Los resultados obtenidos han permitido caracterizar unos sistemas hidrotermales de amplio desarrollo, y que en determinadas circunstancias podrían tener un cierto interés para su aprovechamiento geotérmico.

Palabras clave: *Sistema hidrotermal, convección, transporte de calor, geotermia.*

INTRODUCCIÓN

La cuenca media del río Almanzora (fig. 1a) se sitúa sobre una región de gran complejidad hidrogeológica en la que se pone de manifiesto la existencia de aguas subterráneas con características geoquímicas y de temperatura similares a las que presentan los sistemas geotermales de baja entalpía.

Tales sistemas geotermales parecen asociarse a sistemas fracturados y se manifiestan generalmente en forma de manantiales que drenan los materiales Nevado-Filábrides y Alpujarrides de las Sierras de Lúcar y de las Estancias respectivamente (fig. 1b). En cambio, en el valle bajo del río Almanzora, las manifestaciones geotermales parecen presentarse mayoritariamente en el seno de las depresiones Plio-cuaternarias, posiblemente asociadas a sistemas de carácter convectivo.

El objetivo de este trabajo se centra en caracterizar los mecanismos de flujo subterráneo en los sistemas fisurados y en analizar a nivel cualitativo los procesos de transporte de calor que se producen en los sistemas geotermales de esta región.



SSE

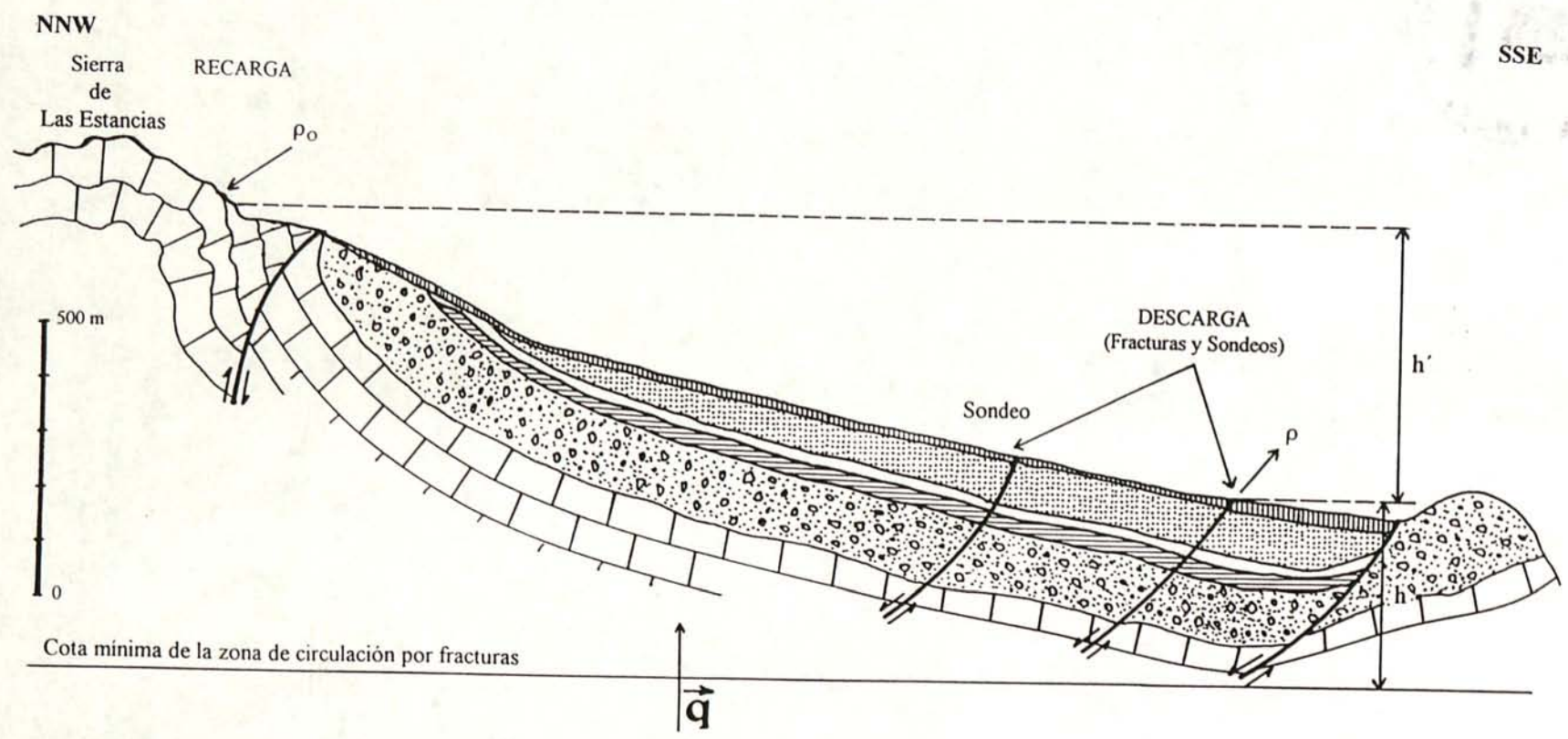


Fig. 2.- Perfil geológico sintético y esquema de funcionamiento simplificado de los sistemas geotermales de la cuenca media del río Almanzora, y que se emplea en el modelo de fisura.

q : flujo de calor
 h' : columna de líquido frío
 h : columna del sifón

- ||||| Glacis
- ▒ Margas y margocalizas
- Microconglomerados y areniscas
- ▨ Arenas y lutitas grises y calizas arrecifales
- ⊞ Conglomerados, arenas y arcillas
- ▤ Calizas y dolomías Triásicas

0 500 1000 m

MARCO HIDROGEOLÓGICO

De los materiales aflorantes en la cuenca media y valle bajo el río Almanzora se pueden considerar como acuíferos los siguientes:

- * Dolomías y mármoles del Complejo Nevado-Filábride.
- * Dolomías y calizas del Complejo Alpujarride.
- * Depósitos aluviales del río Almanzora y sus afluentes.
- * Depósitos neógenos y plio-cuaternarios.

De todos ellos, los sistemas fracturados asociados a los materiales carbonatados del Complejo Alpujarride, constituyen uno de los acuíferos más importantes de la región, tratándose generalmente de acuíferos libres o cautivos cuando se disponen bajo los materiales permeables o semipermeables del Mioceno. Estos acuíferos se desarrollan fundamentalmente en la margen izquierda del río Almanzora (fig. 2) dando lugar a manantiales y fuentes calientes (Fuercaliente, El Higueral, Tijola, etc.) con caudales que oscilan entre 1 y 90 l/s y temperaturas que alcanzan los 35.2 °C. (Cruz et al. 1975, García-Rossell et al. 1993, Vallejos 1991).

En la parte baja de la cuenca, los acuíferos más importantes se encuentran en tres cubetas pliocuaternarias: El Saltador, Pulpí y Overa. Éstas son generalmente de carácter endorréico, salvo la cubeta de Overa, constituida por materiales pliocenos detríticos y depósitos aluviales del río Almanzora (Castillo et al., 1989).

En la cuenca media, las principales surgencias parecen estar ligadas a fracturas desarrolladas en los materiales permo-triásicos, y cuya conexión a través de los materiales neógenos que los cubren permite una salida a la superficie o su explotación mediante pozos y sondeos (fig. 2). Las entradas a estos sistemas proceden de la infiltración de la precipitación, y las salidas tienen lugar a través de galerías, manantiales y bombeos, empleándose estos recursos en el abastecimiento de núcleos urbanos y regadío (Martín Vallejo y García-Rossell, 1994).

En el valle bajo del río Almanzora, las distintas cubetas pliocuaternarias se alimentan fundamentalmente por infiltración de la precipitación y escorrentía superficial en determinadas condiciones, mientras que las salidas más importantes se producen por bombeos, existiendo en algunas de ellas una situación de sobreexplotación. Además, se ha constatado como los pozos más profundos extraen aguas con temperaturas que oscilan entre 30 y 60 °C, valor este último procedente de pozos de desagüe de antiguas instalaciones mineras (De Sierra, 1928; Souviron, 1899; Navarro y Virto, 1994).

Aún son escasas las investigaciones conocidas que aborden el problema del origen de tales aguas, con especial atención a la previsible influencia marina, dada la situación geográfica del acuífero termal y de muchas de sus manifestaciones. No obstante, Martín Vallejo y García-Rossell (1994), sostienen que, de acuerdo con las determinaciones isotópicas de O¹⁸ y D así como de las facies químicas y de oligoelementos, la mayor parte (si no la totalidad) tienen su origen en aguas meteóricas infiltradas a cotas más altas.

APROXIMACIÓN AL FLUJO DE LOS SISTEMAS HIDROTERMALES FRACTURADOS

En la cuenca media del río Almanzora, existen distintas surgencias termales de baja temperatura (Cela, Sierra de Lúcar, etc.) cuyas características geoquímicas e hidrogeológicas sugieren la existencia de sistemas hidrodinámicos relativamente simples. El funcionamiento de tales sistemas parece basarse en la circulación del agua subterránea por el conjunto de fracturas que afectan tanto al zócalo permotriásico como al conjunto terciario, produciéndose la recarga en zonas de

Considerando, por otro lado, que la permeabilidad intrínseca del sistema matriz-fractura es la siguiente:

$$K_s = K_m + K_f \quad [5]$$

donde K_f es la permeabilidad de la fractura que está definida por $K_f = b^3/12a$, siendo b el ancho de la fractura y "a" la separación entre fracturas, podemos definir K_s (permeabilidad del sistema matriz-fractura) del modo siguiente:

$$K_s = K_m + \frac{b^3}{12a} \quad [6]$$

Para el caso de un sistema con varias fracturas por las que se produce una circulación simultánea de fluido geotermal, la ecuación [4] puede generalizarse de la siguiente manera (Navarro y Virto, 1994):

$$\dot{M} = \frac{\rho_0 g \sum_{i=1}^n \frac{(\infty h \Delta T + h')_i}{n}}{\int_0^S \frac{v}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{K_i A_i}{L_i} \right)} ds_i} \quad [7]$$

donde n es el número de fisuras y ds_i^* se define como:

$$ds_i^* = \frac{ds_i}{L_i} \quad [8]$$

Cálculos para un sistema ideal

De acuerdo con las expresiones obtenidas y para un sistema como el que aparece en la fig. 2 y cuyas características se describen en la tabla 1, podríamos calcular el flujo másico con la expresión [4]. Los resultados obtenidos nos dan unos valores de caudal de 0.011 l/s para sistemas constituidos por fracturas individuales y con un desarrollo longitudinal de 5000 m.

En los acuíferos de la cuenca es posible encontrar sistemas con varias fracturas, tal y como puede observarse en el campo, por lo que empleando la expresión [7] se obtienen caudales hidrotermales del orden de 1-2 l/s, coincidentes con los que drenan la mayoría de los manantiales de esta zona. No obstante, existen otros sistemas que proporcionan caudales mucho mayores (Cela, Fuencaliente, etc.), lo que indicaría la existencia de sistemas hidrotermales fracturados con una permeabilidad muy superior a la del resto y posiblemente formados por varias fracturas, lo que da lugar a las surgencias más productivas.

topografía elevada y la descarga en fracturas importantes que dan lugar a los manantiales más conocidos. El aporte de calor al sistema se produciría a una profundidad desconocida con los datos actuales, pero sería suficiente para originar temperaturas de hasta 30 °C en algunos puntos de esta región.

Para analizar el funcionamiento de tales sistemas se ha aplicado el modelo de tubo (Navarro y Virto, 1994) a un esquema simple de flujo subterráneo (fig. 2) que representaría idealmente los sistemas geotermales figurados de la cuenca media del río Almanzora.

De acuerdo con dicho modelo conceptual y considerando las simplificaciones que aparecen en la figura nº 2, tendríamos que el flujo subterráneo vendría dado por la expresión:

$$v = - \frac{K}{\mu} \frac{\partial}{\partial s} (P + \rho g z) \quad [1], \text{ donde:}$$

v: velocidad de Darcy [L T⁻¹]

K: permeabilidad intrínseca [L²]

s: distancia tomada desde el punto de recarga de la fractura [L]

μ: viscosidad dinámica del agua subterránea [F L⁻² T]

P: presión [F L⁻²]

ρ: densidad del agua subterránea [M³ L⁻³]

g: gravedad [L T⁻²]

z: distancia vertical [L]

Por otro lado, el caudal vendría expresado por la ley de Darcy:

$$Q = v A = - \frac{K A}{\mu} \frac{\partial}{\partial s} (P + \rho g z) \quad [2]$$

donde A es la superficie de la sección transversal de la fractura tomada a una distancia s.

En cuanto al flujo másico, vendría dado por:

$$\dot{M} = \rho Q = - \frac{K A}{\nu} \frac{\partial}{\partial s} (P + \rho g z) \quad [3]$$

siendo ν la viscosidad cinemática del agua subterránea.

Como quiera que K, A y ρ varían a lo largo de s, integrando entre z = 0 (ρ = ρ; s = L) y z = h' (ρ = ρ₀; s = 0), obtenemos la siguiente expresión (Navarro y Virto, 1994):

$$\dot{M} = \rho_0 g \frac{(\omega h \Delta T + h')}{\int_0^L \left(\frac{\nu}{K A} \right) ds} \quad [4]$$

VARIABLE	NOTACIÓN	VALOR
Anchura de la fractura	b	0.15 cm
Coefficiente de expansión térmica del líquido	α	$1.5 \cdot 10^{-4} (1/^{\circ}\text{K})$
Porosidad global	ϵ	20%
Viscosidad cinemática	ν	$8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Viscosidad dinámica	μ	$7 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s} (30 ^{\circ}\text{C})$
Permeabilidad intrínseca	k_s	$5.62 \cdot 10^{-13}$
Columna líquido-frío	h'	500 m
Columna del sifón	h	600 m
Incremento de temperatura	ΔT	15 $^{\circ}\text{C}$
Superficie de la fractura	$B \cdot b$	75 m^2

Tabla 1.- Características hidrodinámicas de un sistema geotermal ideal constituido por una fractura simple y ubicado en la cuenca media del río Almanzora. Valores tomados a 30 $^{\circ}\text{C}$.

Simulación matemática del transporte de calor y flujo subterráneo

El carácter convectivo del sistema de flujo subterráneo y transporte de calor también puede verificarse mediante la simulación matemática de dichos fenómenos en la parte baja de la cuenca, contrastándose los resultados simulados con valores reales de la evolución de la temperatura en el terreno.

El modelo empleado resuelve mediante diferencias finitas la ecuación del flujo subterráneo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad [9], \text{ donde:}$$

h: nivel piezométrico.

S_s : Coeficiente de almacenamiento.

k: Conductividad hidráulica.

La simulación del flujo es tridimensional y el programa permite analizar la evolución del nivel frático y la recarga inducida, de forma parecida a como sucede en un sistema acuífero real.

También se resuelve la ecuación del transporte de calor:

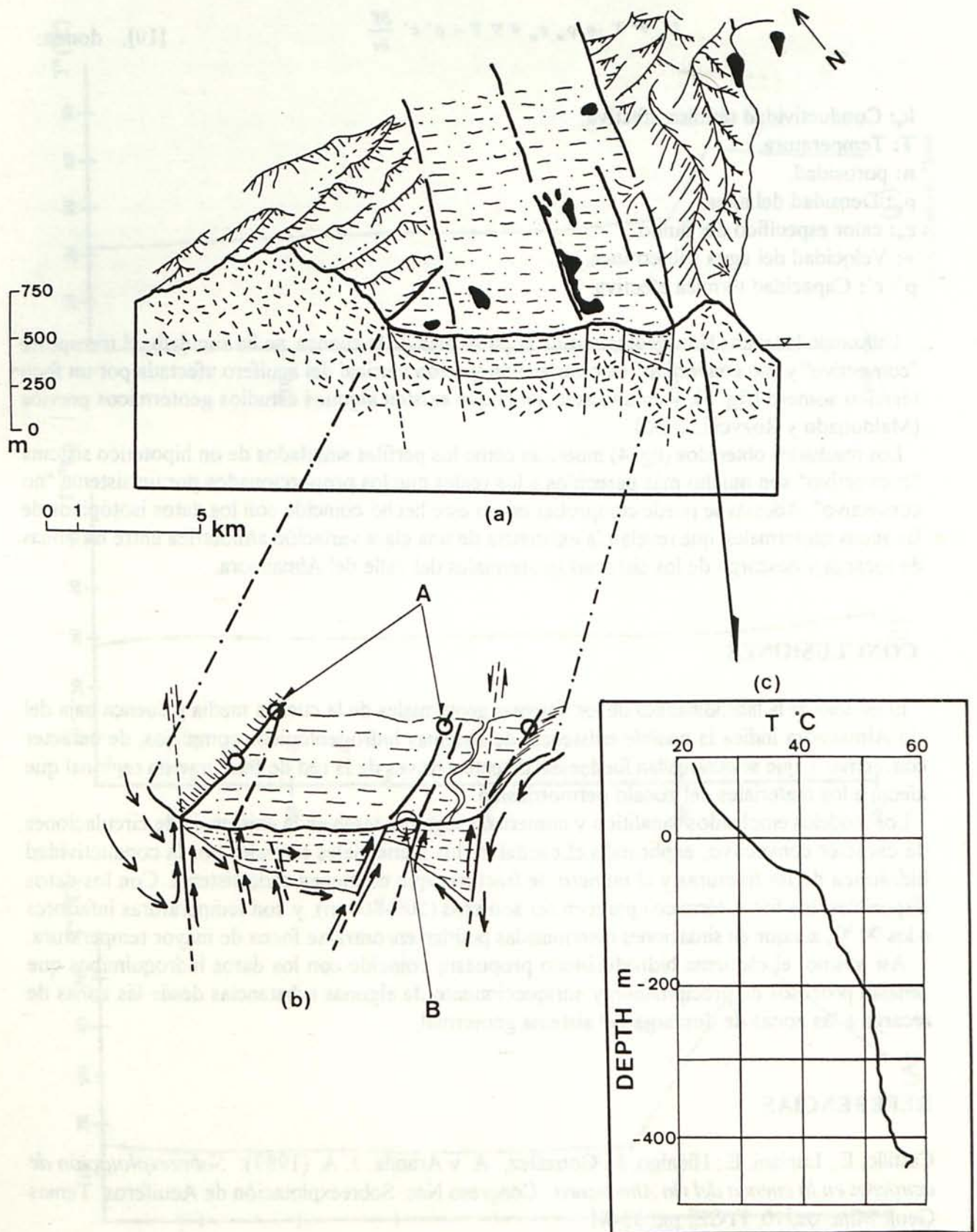


Fig. 3.- Bloque diagrama simplificado del funcionamiento hidrogeológico de los sistemas geotermiales de la cuenca baja del río Almanzora.

a): Bloque-diagrama general de la Depresión Herrerías-Pulpi.

b): Detalle de la zona de Herrerías: A. surgencias y B: mineralizaciones epitermales.

c): Perfil geotérmico en la zona de Sierra Almagrera (Maldonado y Rozicky, 1986).

$$K_e \nabla^2 T - n \rho_w c_w \bar{v} \nabla T - \rho' c' \frac{\partial T}{\partial t}$$

[10], donde:

k_e : Conductividad térmica efectiva.

T : Temperatura.

n : porosidad.

ρ_w : Densidad del agua.

c_w : calor específico del fluido.

\bar{v} : Velocidad del agua subterránea.

$\rho' \cdot c'$: Capacidad térmica efectiva.

Utilizando los datos hidrogeológicos de la parte baja de la cuenca, se ha simulado el transporte "convectivo" y "no convectivo" de calor en una sección vertical del acuífero afectada por un foco térmico somero (fig. 3), y en una zona en la que existen algunos estudios geotérmicos previos (Maldonado y Rozycki, 1986).

Los resultados obtenidos (fig. 4) muestran cómo los perfiles simulados de un hipotético sistema "convectivo" son mucho más parecidos a los reales que los proporcionados por un sistema "no convectivo". Además se puede comprobar cómo este hecho coincide con los datos isotópicos de las aguas geotermales, que revelan la existencia de una clara variación altimétrica entre las zonas de recarga y descarga de los sistemas geotermales del valle del Almanzora.

CONCLUSIONES

El estudio de la hidrodinámica de los sistemas geotermales de la cuenca media y cuenca baja del río Almanzora indica la posible existencia de sistemas hidrogeológicos complejos, de carácter convectivo, y que se desarrollan fundamentalmente a través de la red de fracturación regional que afecta a los materiales del zócalo permotriásico.

Los modelos empleados (analítico y numérico) sugieren también la existencia de circulaciones de carácter convectivo, explicando el caudal de los manantiales termales por la conductividad hidráulica de las fracturas y el número de fracturas que contienen cada sistema. Con los datos disponibles, los focos térmicos parecen ser someros (500-800 m), y con temperaturas inferiores a los 90 °C, aunque en situaciones determinadas podrían encontrarse focos de mayor temperatura.

Así mismo, el esquema hidrodinámico propuesto coincide con los datos hidroquímicos que señalan procesos de precipitación y enriquecimiento de algunas sustancias desde las zonas de recarga a las zonas de descarga del sistema geotermal.

REFERENCIAS

Castillo, E.; Lupiani, E.; Hidalgo, J., González, A. y Aranda, J. A. (1989): *Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del río Almanzora*. Congreso Nac. Sobreexplotación de Acuíferos. Temas Geol. Mineros, 10. ITGE, pg. 35-41.

Cruz San Julián, J. y García-Rossell, L. (1975): Termalismo en España meridional. *Bol. Geológico y Minero*. IGME. Madrid. Vol. LXXXVI-II, pp. 179-186

De Sierra, A. (1928): *Los hierros de Almería y Granada*. Memorias IGME, 657 pp.

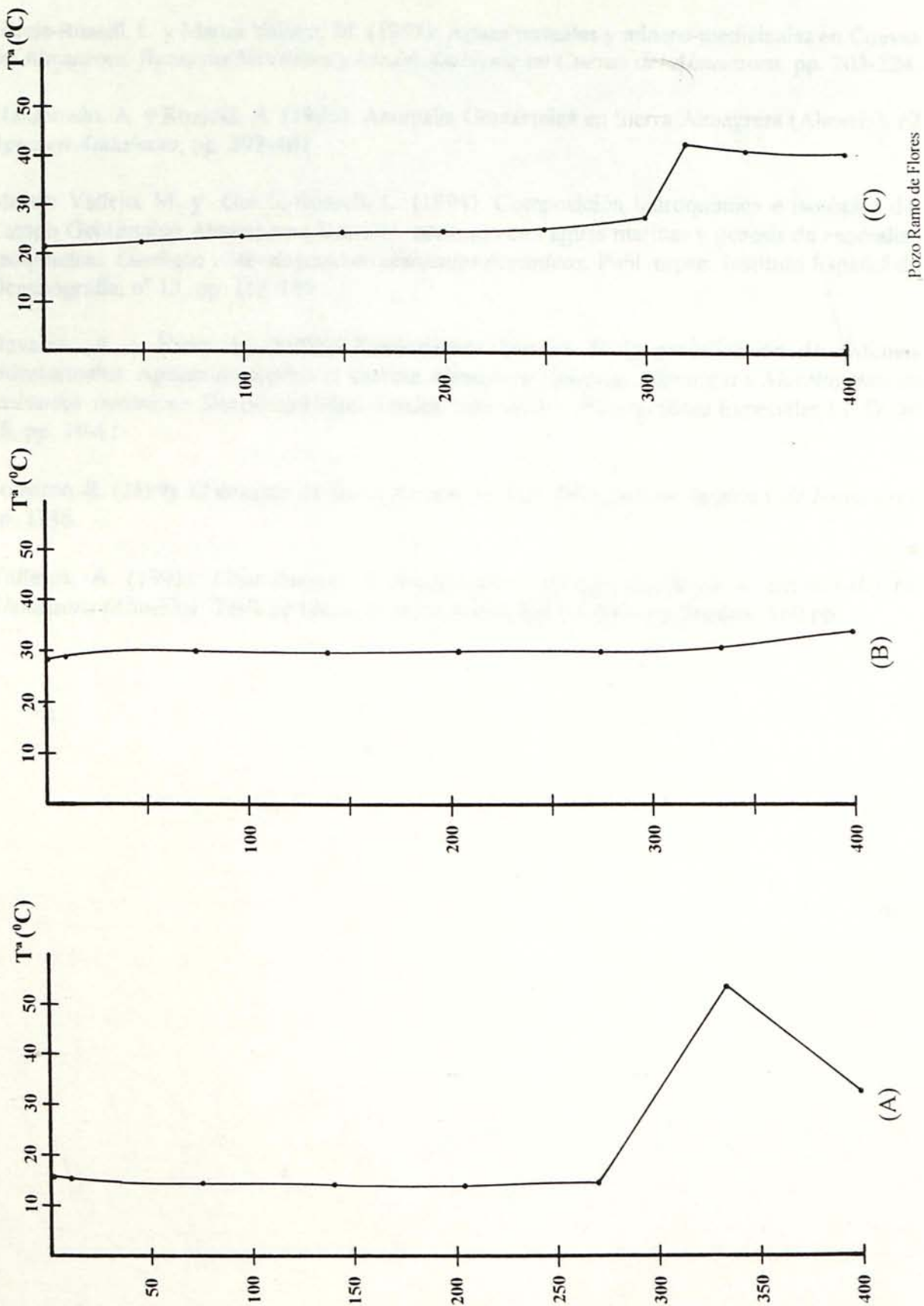


Fig. 4.- Comparación entre los perfiles térmicos simulados de un sistema "convectivo" (A), "no convectivo" (B) y el correspondiente a los sondeos realizados en la zona (C).

García-Rossell, L. y Martín Vallejo, M. (1993): Aguas termales y minero-medicinales en Cuevas del Almanzora. *Recursos Naturales y Medio Ambiente en Cuevas del Almanzora*, pp. 203-224.

Maldonado, A. y Rozicki, A. (1986): Anomalia Geotérmica en Sierra Almagrera (Almería). *El Agua en Andalucía*, pp. 393-401.

Martín Vallejo, M. y García-Rossell, L. (1994). Composición hidroquímica e isotópica del Campo Geotérmico Almanzora (Almería): conexión con aguas marinas y génesis de anomalías geoquímicas. *Geología y Metalogenia en ambientes oceánicos*. Publ. espec. Instituto Español de Oceanografía, nº 13, pp. 153-159.

Navarro, A. y Virto, L. (1994): Fundamentos básicos de la modelización de sistemas hidrotermales. Aplicación teórica al sistema Almagrera-Herrerías. *Geología y Metalogenia en ambientes oceánicos*. Depósitos Hidrotermales Submarinos. Publicaciones Especiales I.E.O., nº 18, pp. 39-51.

Souviron, R. (1899): El desagüe de Sierra Almagrera. *Rev. Minera Metalúrgica y de Ingeniería*, pp. 1716.

Vallejos, A. (1991): *Contribución al conocimiento hidrogeológico de la cuenca del río Almanzora (Almería)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada. Inédita. 160 pp.



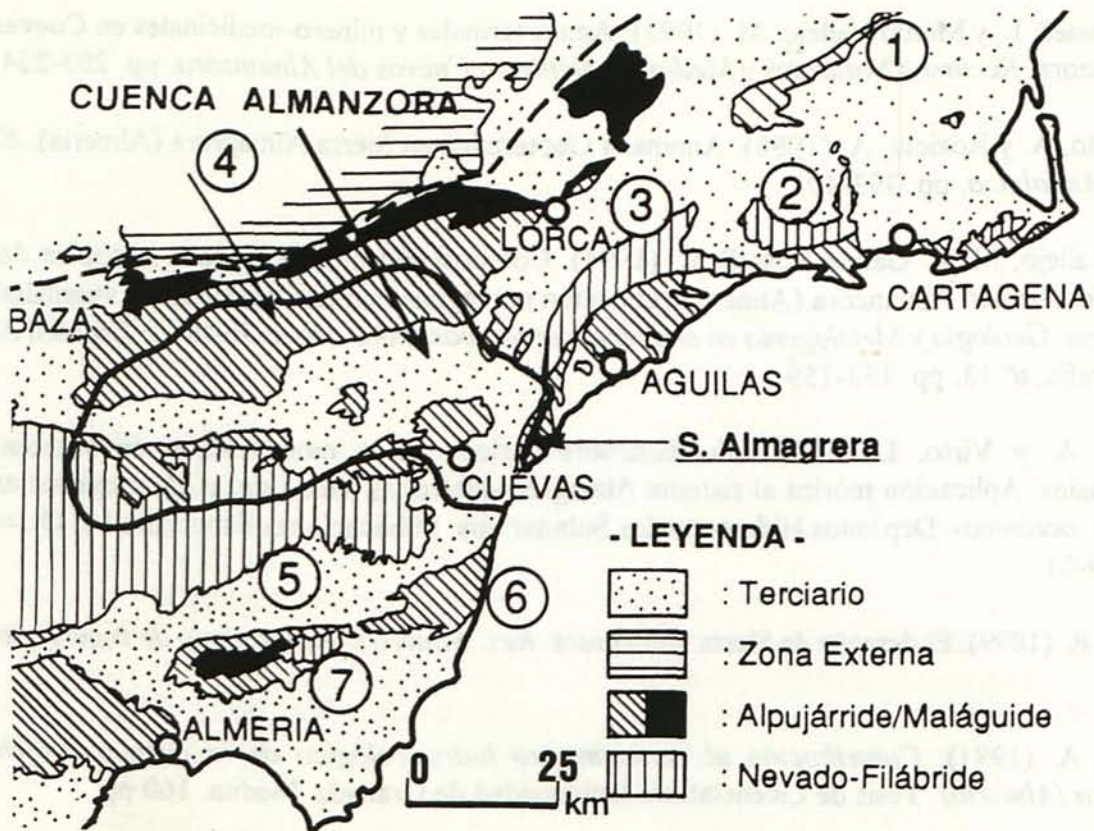


Fig. 1a.- Mapa de situación de la cuenca del río Almanzora.

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1: S. de Carrascoy | 5: S. de los Filabres |
| 2: S. del Algarrobo | 6: S. Cabrera |
| 3: S. Almenara | 7: S. Alhamilla |
| 4: S. de las Estancias | |

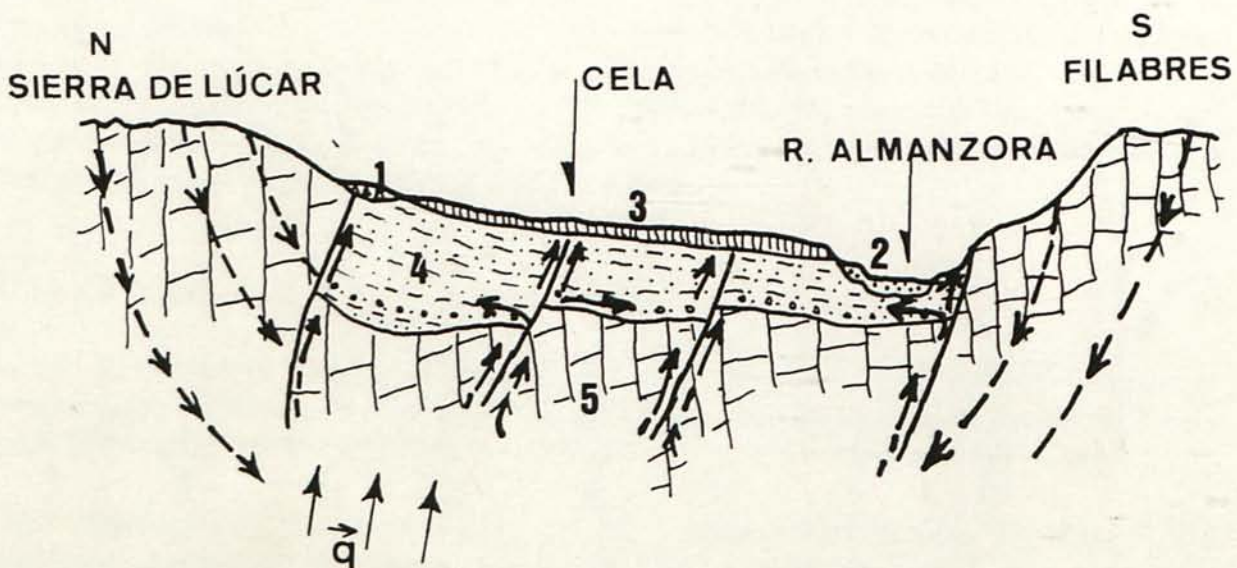


Fig. 1b.- Perfil geológico ideal de la cuenca media del río Almanzora, en el que se expone el modelo conceptual de flujo subterráneo y transporte de calor.

1 (Travertinos), 2 (Terrazas aluviales), 3 (Glacis), 4 (Terciario), 5 (Basamento)