

# Análisis de la respuesta hidrodinámica de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética occidental (Sur de España)

P. Jiménez<sup>(1)</sup>, F. Carrasco<sup>(1)</sup>, J.J. Durán<sup>(2)</sup>, B. Andreo<sup>(1)</sup>, y J.A. López-Geta<sup>(2)</sup>

(1) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias. Departamento de Geología. Universidad de Málaga. 29071 Málaga.  
E-mail: pgavilan@uma.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.  
E-mail: jj.duran@igme.es

## RESUMEN

Se ha llevado a cabo un análisis hidrodinámico de las series de datos de caudal de los principales manantiales de seis acuíferos carbonáticos del sector occidental de la Cordillera Bética. Estos acuíferos presentan diferentes características climáticas, litológicas, geomorfológicas y tectónicas, lo que ha originado diferencias en la karstificación funcional en ellos desarrollada, tal como ponen de manifiesto los diversos parámetros obtenidos a partir del análisis de hidrogramas, de las curvas de recesión (decrecida y agotamiento) y del análisis correlatorio y espectral. Se ha establecido un primer grupo de acuíferos en los que la recarga y el agotamiento de los manantiales que los drenan se produce de manera rápida, además presentan importantes diferencias entre los caudales máximos y mínimos, se trata de "acuíferos carbonáticos con karstificación funcional". No obstante, este grupo en función de su menor o mayor capacidad de regulación se puede subdividir en "acuíferos carbonáticos con elevada y con moderada karstificación funcional" respectivamente. Existe un tercer grupo de acuíferos que se caracterizan porque la recarga se produce de forma lenta, los manantiales de estos acuíferos presentan escasas diferencias entre los caudales máximos y mínimos así como agotamientos lentos, por lo que su poder regulador es alto. Todas estas características ponen de manifiesto que presentan un flujo de tipo difuso propio de "acuíferos carbonáticos fisurados sin karstificación funcional".

Palabras clave: acuíferos carbonáticos, hidrodinámica, karstificación funcional, Sur de España

## ***Analysis of hydrodynamic response of carbonate aquifers from the western Betic Cordillera (southern Spain)***

### ABSTRACT

*A hydrodynamic analyses of six carbonate aquifers of the Betic Cordillera has been done by using records of discharge data from the main discharge points of these aquifers, which are representative of a wide range of characteristics in terms of their climate, geology, geomorphology and tectonics. Several parameters obtained of the application of the correlation and spectral analyses and the analysis of hydrographs make evident that these aquifers present different degree of functional karstification. A first group of aquifers have been established, in which as much the recharge as depletion period are rapid processes, moreover they present important differences between the maximum and minimal outflows. These aquifers are "carbonate aquifer with functional karstification". Nevertheless, it is possible to subdivide inside this group according to their minor or major regulation capacity in "carbonate aquifers with great and moderate functional karstification" respectively. Finally, a third group of aquifers have been established which are characterized by a rapid recharge and also because the springs of these aquifers show little differences between the maximum and minimal outflows as well as slow depletion periods. Therefore, all these characteristics is linked to "fissured carbonate aquifers without functional karstification".*

*Key words: carbonate aquifers, hydrodynamic, functional karstification, Southern Spain*

## Introducción

El análisis de las respuestas naturales de los principales manantiales que drenan los acuíferos carboná-

ticos permite conocer el grado de karstificación funcional, y por tanto, el nivel de desarrollo y organización de su estructura de drenaje.

El conocimiento de la estructura de drenaje es

indispensable para la gestión de los recursos hídricos, la definición de perímetros de protección o el establecimiento del grado de vulnerabilidad frente a la contaminación. Así, en los acuíferos con una karstificación funcional desarrollada, los flujos se producen de forma rápida, sin que el agua permanezca mucho tiempo dentro del sistema, por lo que la gestión y/o actuación sobre este tipo de acuíferos está muy limitada en el tiempo.

En este trabajo, se realiza el análisis de la respuesta hidrodinámica en diferentes manantiales de acuíferos carbonáticos de la parte occidental de la Cordillera Bética a partir de las series de caudales con objeto de determinar su comportamiento. Los acuíferos investigados, presentan distintas características climáticas, litológicas, geomorfológicas y tectónicas, lo que ha condicionado diferencias en el potencial de karstificación y, por tanto, en la karstificación funcional que se ha desarrollado en ellos.

Un primer estudio de estos acuíferos se expone en Jiménez *et al.* (2002) cuya finalidad era la de proponer unos parámetros, fáciles de obtener, mediante los que se pueda hacer una clasificación sencilla de los acuíferos carbonáticos en función de su respuesta hidrodinámica.

### **Características geológicas e hidrogeológicas de los sistemas acuíferos analizados**

Se han seleccionado seis acuíferos pertenecientes al sector occidental de la Cordillera Bética (Fig. 1) cuyas características geológicas e hidrogeológicas se resumen a continuación.

La Sierra de las Cabras está situada en la parte central de la provincia de Cádiz. Presenta una superficie de 42 km<sup>2</sup> y está formada por un conjunto calizo-dolomítico jurásico con una estructura en pliegues anticlinales y sinclinales afectados por una tectónica de fractura posterior (Chauve, 1960-62; Martín Algarra, 1987). Las calizas y dolomías del Jurásico constituyen un acuífero cuya alimentación se produce por infiltración directa de las precipitaciones y, eventualmente, por infiltración de parte de la escorrentía que circula por dos arroyos que atraviesan el acuífero. La descarga tiene lugar, de modo natural, por el manantial de El Tempul cuyo caudal medio es de 283 L/s; además, en épocas de recarga excepcional, entra en funcionamiento el "trop plein" de Fuente Imbro cuya cota de surgencia se encuentra a 20 metros por encima del manantial de El Tempul (Jiménez *et al.*, 2001).

Entre las provincias de Málaga y Cádiz, al Oeste de la localidad de Ronda (Málaga), se encuentra la Sierra

de Líbar, con una extensión de 103 km<sup>2</sup> de dolomías y calizas jurásicas con una estructura de pliegues anticlinales en cofre (Martín-Algarra, 1987). La Sierra de Líbar es uno de los máximos exponentes del modelado kárstico de la Cordillera Bética, dada la gran cantidad de formas existentes tanto exokársticas (poljes, dolinas y lapiares) como endokársticas (simas y cuevas). La descarga del acuífero se produce a través de manantiales situados en la vertiente oriental de la Sierra: Cueva del Gato, Molino del Santo (Benaoján) y Jimera de Líbar en el sector norte y el manantial del Charco del Moro en el sector sur. La Cueva del Gato presenta un caudal medio de 1537 L/s y constituye la salida natural del río Gadales a través del sistema Hundidero-Gato, el cual conecta la sima del Hundidero, punto en el que se infiltra la mayoría del agua del embalse de Montejaque, y el manantial situado 3 km al SE.

El macizo carbonático del Torcal de Antequera (provincia de Málaga) presenta una superficie de 35 km<sup>2</sup> y muestra similares características litológicas, estructurales y geomorfológicas que la Sierra de Líbar. La alimentación que recibe es sólo la procedente de las precipitaciones y la descarga tiene lugar, casi en su totalidad, a través del manantial de La Villa, con un caudal medio de 314 L/s (Jiménez *et al.*, 2002).

Al Este del Torcal de Antequera, y dentro de la misma alineación montañosa de éste último, se encuentra la Sierra de Camarolos con una superficie aproximada de 30 km<sup>2</sup> (DPM, 1988). La hidrogeología de este acuífero está condicionada por la intensa y compleja tectonización interna de los materiales carbonáticos jurásicos (dolomías y calizas). Además, se trata de un acuífero que no recibe más alimentación que la procedente de las precipitaciones y cuya descarga se produce fundamentalmente por los manantiales de Villanueva del Rosario y del Parroso, con caudales medios de 330 L/s y 56 L/s respectivamente (Jiménez *et al.*, 2002).

En la vertiente meridional de Sierra Blanca (Málaga), al Norte de la localidad de Marbella, se encuentra el acuífero de Ojén, el cual presenta una superficie próxima a 13 km<sup>2</sup> y está formado por mármoles triásicos alpujárrides con una estructura de sinclinal tumbado vergente al Oeste (Andreo, 1997). Las formas exo y endokársticas son bastante escasas. El principal punto de descarga es el manantial de Ojén, con un caudal medio de 53 L/s.

El sistema de Torremolinos, situado en el sector más oriental de la Sierra de Mijas (Málaga), está constituido por mármoles dolomíticos triásicos con aspecto sacaroideo que abarcan una extensión aproximada de 45 km<sup>2</sup>. Su estructura está formada por pliegues isoclinales de dirección ESE-ONO que condi-

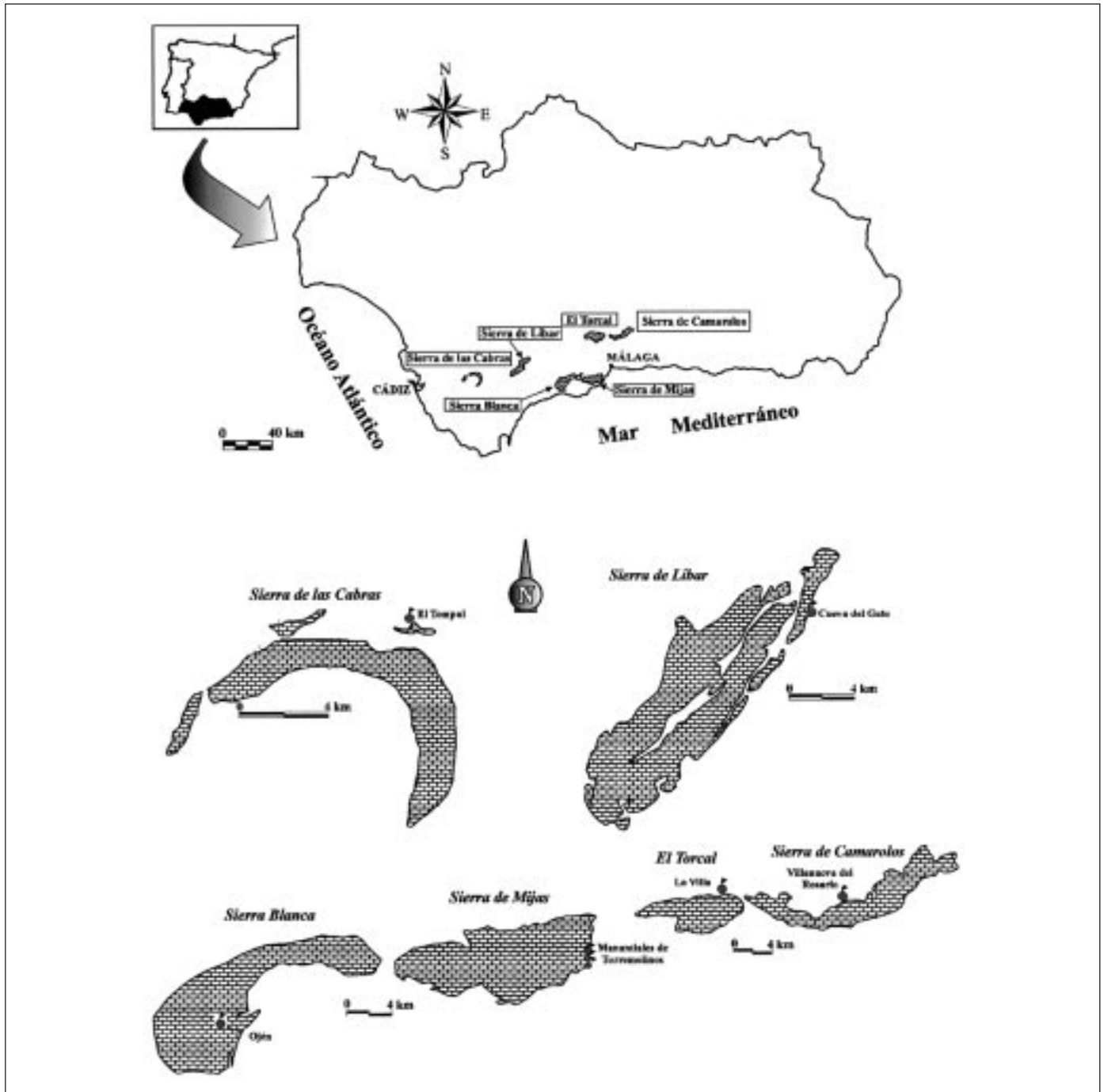


Fig. 1. Localización geográfica de las áreas de estudio  
 Fig. 1. Geographical location of the study areas

cionan la morfología en planta de las escasas cavidades kársticas existentes (Andreo, 1997). La descarga se realiza fundamentalmente por cinco surgencias situadas en la parte oriental del sistema que presentan un caudal medio conjunto de 456 L/s en régimen de descarga natural. A partir de 1973 los manantiales

muestran afecciones de los bombeos y, actualmente, el ritmo de explotación para abastecer la demanda de agua provocada por el turismo ha originado el agotamiento de los manantiales y sólo mana agua de forma esporádica en períodos de muy altas precipitaciones.

## Metodología

Los trabajos realizados por diferentes organismos públicos y entidades privadas han permitido recopilar series de datos temporales de los principales manantiales que drenan los seis sistemas acuíferos caracterizados en el apartado anterior. La longitud o duración de las series de datos abarca varios años, en algún caso varias décadas, con una periodicidad de medida diaria, a excepción de los manantiales de Torremolinos, donde ha sido semanal. Se ha dispuesto, por tanto, de series de datos excepcionalmente largas en algunos casos, que son susceptibles de ser tratadas mediante diferentes metodologías.

Un primer análisis de los hidrogramas de manantiales que drenan estos acuíferos ofrece la posibilidad de estimar la importancia relativa de la red kárstica y de los bloques capacitivos en el acuífero drenado y, de este modo, determinar de manera indirecta el grado de karstificación funcional del sector drenado por estos manantiales. Los caudales máximos y mínimos anuales, la forma del hidrograma, el número de crecidas anuales, informan sobre la capacidad de filtro del acuífero sobre las precipitaciones y, por tanto, de su grado de karstificación.

Entre las diferentes metodologías existentes para el estudio de la curva de recesión, la desarrollada por A. Mangin (1970, 1975) constituye un método riguroso y específico para el análisis de la descarga de acuíferos carbonáticos. Esta metodología es muy aceptada y se ha utilizado con frecuencia (Pulido, 1979; Cruz Sanjulián *et al.*, 1986; Antigüedad, 1986; Padilla, 1990; Andreo *et al.*, 1992; Carrasco *et al.*, 2001; Jiménez *et al.*, 2003, entre otros muchos ejemplos), ya que tiene en cuenta toda la curva de recesión. Este método se basa en la distinción de dos subsistemas dentro del sistema kárstico: el subsistema infiltración, correspondiente al drenaje de la zona no saturada y de la zona saturada durante la decrecida (infiltración modulada por su transferencia a través de la zona saturada) y el subsistema saturado, correspondiente al drenaje de la zona saturada en régimen no influenciado (agotamiento).

Dentro de las diferentes técnicas o métodos de análisis de series temporales, el análisis correlatorio y espectral es un método que considera la totalidad de datos disponibles y se puede aplicar en el dominio temporal (análisis correlatorio) y en el dominio de las frecuencias (análisis espectral). La aplicación de esta metodología permite identificar la estructura y componentes de dichas series de datos. A partir de éstas se obtiene información del comportamiento del sistema carbonático estudiado, es decir, de su dinámica, del grado de organización del drenaje kárstico y, en

definitiva, del efecto modulador producido por éste sobre la señal de entrada. Esta metodología fue puesta a punto y utilizada por Mangin (1981a y b; 1984) para el estudio de sistemas kársticos en el Pirineo francés. Así, son muchos los acuíferos carbonáticos en los que se ha aplicado esta metodología: en el País Vasco (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1987; Ibarra *et al.*, 1987; Antigüedad *et al.*, 1988; Morales, 1992), Cordillera Bética (Mangin y Pulido, 1983; Benavente y Mangin, 1984; López Chicano, 1992; Pulido, 1993; Padilla y Pulido, 1995; Andreo, 1997; Jiménez *et al.*, 2001 y 2003), Cordillera Ibérica (Obartí, 1987; Esteller *et al.*, 1996; Garay 2000 y 2002) y en Cataluña (Freixes *et al.*, 1996).

## Resultados

### Análisis de la forma de los hidrogramas

Se ha obtenido el hidrograma de los diferentes manantiales y se ha calculado la media de los caudales máximos y mínimos anuales (Fig. 2).

El hidrograma del manantial de El Tempul (Fig. 2A) permite observar que sólo se registra una crecida importante por cada año hidrológico. Además, ésta presenta una cierta anchura, lo que parece reflejar un drenaje relativamente lento de la zona no saturada. La relación entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos es baja (14'9).

Muy diferente es el hidrograma del manantial de la Cueva del Gato (Fig. 2B) que suele registrar, al menos, dos o tres crecidas importantes en un mismo año hidrológico con una forma aguda y estrecha. Esta morfología unida a la rápida respuesta hidrodinámica de la surgencia frente a importantes eventos pluviométricos es debida, al menos en parte, a que la recarga se produce por la infiltración de la escorrentía generada en la cuenca endorreica del río Gadares. Además, este manantial presenta un valor de la relación  $\overline{Q}_{\max} / \overline{Q}_{\min}$  de 231'5, bastante más elevado que en el resto de surgencias estudiadas (Tabla 1).

El manantial de la Villa se encuentra parcialmente regulado mediante bombeos para el abastecimiento a Antequera (sobre todo durante los períodos de estiaje). Esta regulación se lleva a cabo desde el año 1977, en unos sondeos ejecutados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en su entorno. El hidrograma (Fig. 2C) permite constatar que en la mayoría de años hidrológicos se suele registrar una sola crecida con una forma aguda en las proximidades de la punta y más ancha en su base. La relación entre los valores medios de los caudales máximos y mínimos es, relativamente baja, 18'5 (Tabla 1). No

obstante, esta relación debe de ser más elevada, ya que se ha considerado como caudal mínimo el que presentaba el manantial antes de los bombeos estivales y, por tanto, superior al valor de caudal que tendría el manantial al final del estiaje.

El hidrograma del manantial de Villanueva del Rosario (Fig. 2D) muestra, al igual que la surgencia del Cueva del Gato, que en un mismo año hidrológico se suelen registrar varias crecidas importantes con hidrogramas agudos y estrechos. También presenta un alto valor (67,8) de la relación  $\overline{Q}_{max} / \overline{Q}_{min}$ .

Similares características presenta el hidrograma del manantial de Ojén (Fig. 2E): varias crecidas dentro de un mismo año hidrológico y una elevada relación entre la media de los caudales máximos y mínimos (89,5).

En contraposición a los dos anteriores, el hidrograma conjunto de los manantiales de Torremolinos (Fig. 2F) muestra, generalmente, una sola crecida al año con una punta poco marcada y una gran anchura, junto con una baja relación  $\overline{Q}_{max} / \overline{Q}_{min}$  (1,7).

### Análisis de la curva de recesión

La curva de recesión se puede descomponer en dos partes: una primera, la decrecida propiamente dicha, en la que el caudal disminuye de manera más o menos rápida en función del modo con que se lleve a cabo la recarga y otra segunda, el agotamiento, en la que el caudal decrece de manera más o menos lenta en función del estado de la zona saturada.

En este trabajo se aplica el modelo propuesto por

Mangin (1970, 1975), que se basa en la caracterización de ambas partes mediante unos parámetros que permiten conocer el funcionamiento y la estructura del acuífero estudiado. El caudal de manantial durante la decrecida representa el efecto de la recarga a través de la zona no saturada, modificada posteriormente por su paso por la zona saturada. La decrecida queda caracterizada por los parámetros  $\eta$  y  $\varepsilon$ , ambos de dimensiones  $T^{-1}$ . El primero es el coeficiente de velocidad de infiltración, que indica la duración de la infiltración hacia el manantial, a mayor  $\eta$  menor será el tiempo de influencia de la infiltración, es decir ésta será más rápida. El segundo es el coeficiente de heterogeneidad cuyo valor permite estimar la capacidad de moderación de la zona no saturada sobre la infiltración. Cuanto mayor sea  $\varepsilon$  menor será la participación de la zona no saturada en la descarga del manantial.

La determinación de  $\eta$  y  $\varepsilon$  permite conocer la función "y" que es independiente de la amplitud de la crecida. El valor de esta función varía entre 0 y 1 y sirve como criterio de comparación entre diferentes sistemas acuíferos. El valor de la función y para un tiempo de 2 días es el índice *i* (Mangin, *op. cit.*). El agotamiento queda caracterizado por el coeficiente  $\alpha$  que está relacionado, fundamentalmente con la zona saturada del acuífero.

A partir de este tratamiento Mangin (1975) propone utilizar, como criterio de clasificación y comparación de acuíferos kársticos, dos parámetros: *i* y *k*. El parámetro *i* caracteriza la forma de la decrecida y el parámetro *k* está relacionado con la capacidad de regulación del acuífero.

	Hidrograma		Análisis de la curva de recesión							Análisis correlatorio y espectral		
	$\overline{Q}_{max} / \overline{Q}_{min}$	Número de crecidas al año	Duración de la decrecida (días)	Velocidad Infiltración (Decrecida) $\eta$ (días <sup>-1</sup> )	Coefficiente de Heterogeneidad (Decrecida) $\varepsilon$ (días <sup>-1</sup> )	Decrecida <i>i</i>	Duración del agotamiento (días)	Agotamiento $\alpha$	Poder Regulador <i>k</i>	Efecto Memoria (días)	Tiempo de Regulación ( $S_e/2$ )	Frecuencia de corte ( <i>f</i> )
Sierra de las Cabras (El Tempul)	14,9	1	170	0,0060	0,0132	0,96	147	1,58E-03	0,60	91	85	0,03
Sierra de Líbar (Cueva del Gato)	231,5	2-3	21	0,0525	0,0970	0,75	143	1,30E-02	0,11	45	37	0,07
El Torcal (La Villa)	18,5	1	23	0,0448	0,1186	0,74	137	1,37E-02	0,41	74*	73*	0,05*
Sierra de Camarolos (Vill. del Rosario)	67,8	2-3	49	0,0236	0,0598	0,86	103	1,55E-02	0,15	65	54	0,06
Sierra Blanca (Ojén)	89,5	2-3	23	0,0448	0,0285	0,75	181	1,37E-02	0,29	96	68	0,09
Sierra de Mijas (Torremolinos)	1,7	1	170	0,0058	0,0239	0,94	1236	2,42E-04	11,59	160	94	0,03

Tabla 1. Resumen de las principales características y parámetros analizados para cada uno de los acuíferos estudiados. Ver explicación en el texto. Leyenda:  $\overline{Q}_{max}$  media de los caudales máximos y  $\overline{Q}_{min}$  media de los caudales mínimos,  $\alpha$  coeficiente de agotamiento, *i* y *k* parámetros de Mangin (1970, 1975). (\*) tomado de Mangin y Pulido (1983)

Table 1. Summary of the results obtained for the studied aquifers. See text for further details. Legend:  $\overline{Q}_{max}$  average maximum outflows and  $\overline{Q}_{min}$  average minimum outflows,  $\alpha$  depletion coefficient, *i* and *k* Mangin parameters (1970, 1975). (\*) Mangin y Pulido (1983)



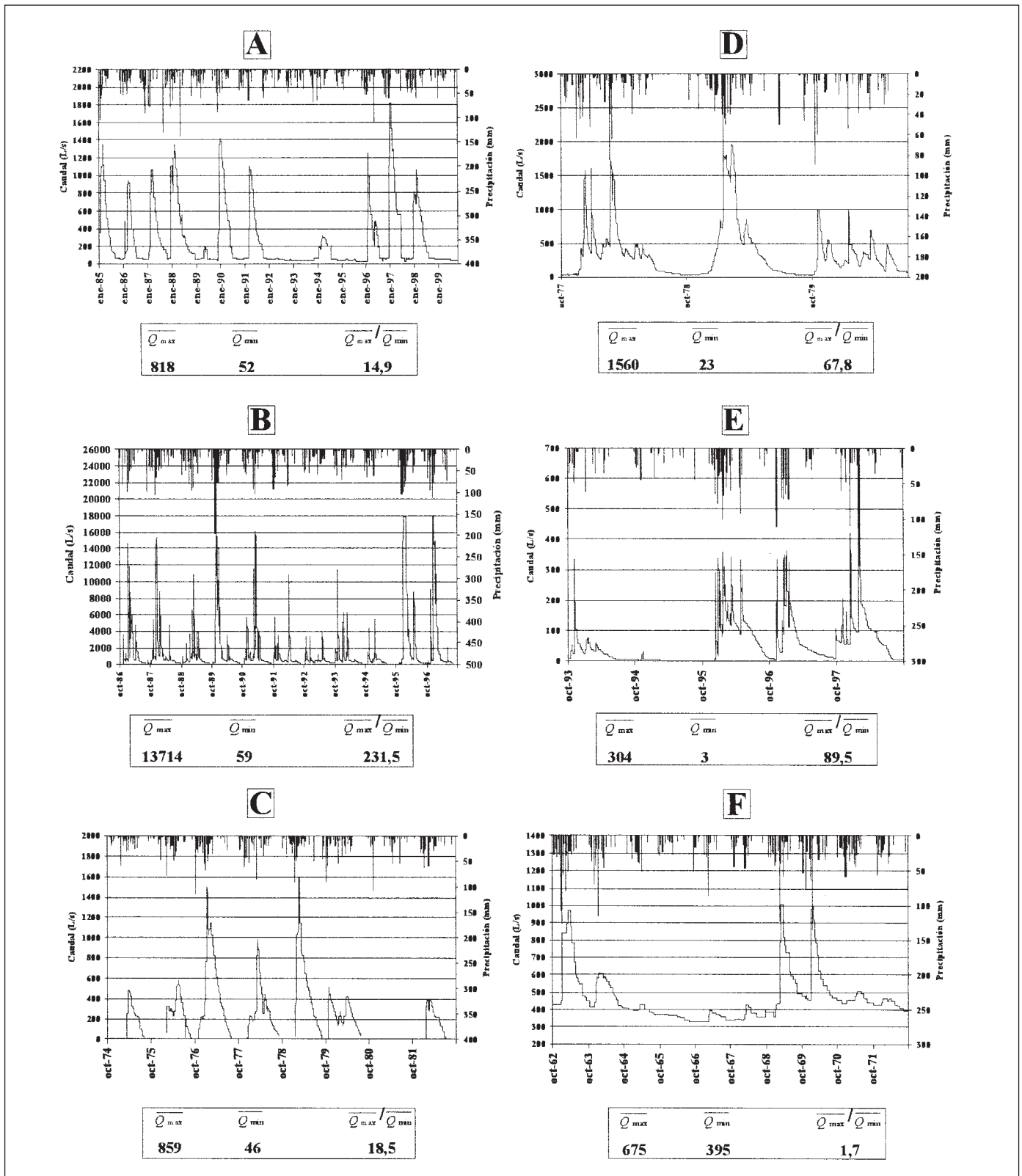


Fig. 2. Hidrogramas de los manantiales estudiados. Leyenda:  $\overline{Q}_{max}$  media de los caudales máximos,  $\overline{Q}_{min}$  media de los caudales mínimos en L/s. (A) El Tempul, (B) Cueva del Gato, (C) La Villa, (D) Villanueva del Rosario, (E) Ojén, (F) Torremolinos  
 Fig 2. Hydrographs of the studied springs. Legend:  $\overline{Q}_{max}$  average maximum outflows,  $\overline{Q}_{min}$  average minimum outflows, in L/s. (A) El Tempul, (B) Cueva del Gato, (C) La Villa, (D) Villanueva del Rosario, (E) Ojén, (F) Torremolinos

En la tabla 1 se recogen los datos relativos a los valores medios obtenidos del estudio de diferentes curvas de recesión para cada manantial. Es preciso indicar que en casi todos los casos se han analizado hidrogramas unitarios, es decir, no se han tenido en cuenta hidrogramas en los que se hayan producido crecidas durante la decrecida o el agotamiento.

Un análisis conjunto de los resultados obtenidos (Tabla 1) permite constatar que tanto los valores de duración de la decrecida como los del agotamiento varían de manera significativa de unas surgencias a otras. En lo que se refiere a la duración de la decrecida  $y$ , en consecuencia a la velocidad de infiltración, cabe diferenciar que un grupo de manantiales (Cueva del Gato, La Villa y Ojén) presenta un tiempo de decrecida próximo a 25 días, lo que traduce una velocidad de infiltración rápida y en otros (El Tempul y Torremolinos) la decrecida tiene una alta duración (170 días)  $y$ , por ello, una velocidad de infiltración muy lenta. Los diferentes valores del parámetro  $\varepsilon$  (entre 0,1 y 0,02) ponen de manifiesto que la zona no saturada de los acuíferos drenados participa durante diferente tiempo en la descarga de los manantiales.

El valor del parámetro  $i$  es bastante alto para todos los manantiales analizados, con valores comprendidos entre 0,74 y 0,96, representativos de sistemas kársticos complejos (Mangin, *op. cit.*) y en cualquier caso son valores alejados de los que caracterizan a los sistemas con una red de drenaje muy desarrollada que presentan valores inferiores a 0,25.

El coeficiente de agotamiento ( $\alpha$ ) también permite establecer dos tipos de comportamiento en los manantiales estudiados. Este coeficiente con valores del orden de  $10^{-2}$  días<sup>-1</sup>, caracteriza a los sistemas de tipo kárstico (Cueva del Gato, La Villa, Villanueva del Rosario y Ojén), mientras que los manantiales que presentan valores de  $\alpha$  del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  días<sup>-1</sup> (El Tempul y Torremolinos) son propios de sistemas menos karstificados, con flujo de tipo difuso.

El parámetro  $k$  traduce la capacidad del acuífero para restituir progresivamente una parte del volumen de agua que lo atraviesa. Se define como la relación entre el volumen dinámico (volumen de agua almacenado en la zona saturada al comienzo del agotamiento) y el volumen de tránsito (volumen de agua emitido por el manantial en un año hidrológico medio). Según Mangin (1975) los acuíferos kársticos presentan un valor de  $k < 0,5$  y en los sistemas con  $k < 0,1$  el poder regulador es escaso y predomina la componente rápida de la infiltración. De acuerdo con los valores obtenidos para este parámetro los acuíferos drenados por los manantiales estudiados presentan importantes diferencias en cuanto a su poder regulador.

### **Análisis correlatorio y espectral (ACE)**

Se ha realizado un análisis correlatorio y espectral a las series de caudales medios diarios de cuatro de los manantiales estudiados y con los valores medios semanales en el caso de las surgencias de Torremolinos. El tratamiento se ha realizado con una ventana de observación de 125 días y paso de un día.

Con respecto al correlograma simple el parámetro más interesante es el efecto memoria, que según Mangin (1981 a y b) se define como el valor de  $k$  (días) para  $r = 0'1-0'2$ . En el dominio frecuencial, la anchura de la banda espectral o frecuencia de corte permite conocer desde un punto de vista cuantitativo la capacidad de filtro del sistema, mientras que la duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre el sistema viene determinada a partir del parámetro denominado tiempo de regulación, que se define por  $S_0/2$ , donde  $S_0$  es el valor del espectro para  $f=0$ .

La aplicación del ACE a la serie de caudales del manantial de El Tempul da lugar a un correlograma muy tendido (Fig. 3A), con un efecto memoria muy considerable, 91 días. El espectro de frecuencia (Fig. 3B) muestra que la banda espectral es muy estrecha (frecuencia de corte = 0,03) y un tiempo de regulación muy elevado (85 días).

El manantial de la Cueva del Gato presenta un correlograma poco tendido (Fig. 3C), con un menor efecto memoria, del orden de los 45 días. En cuanto a los resultados obtenidos en el dominio de las frecuencias (Fig. 3D), la frecuencia de corte es de 0'07 y el tiempo de regulación es de 37 días.

En el manantial de La Villa no ha sido posible realizar el análisis correlatorio y espectral debido a que la serie de datos es discontinua por los bombeos que se realizan para la regulación de su descarga. Autores previos (Mangin y Pulido, 1983; Padilla, 1990) han aplicado esta metodología reconstituyendo la serie de caudales. Los resultados obtenidos por dichos autores en cuanto a los parámetros más significativos (efecto memoria, tiempo de regulación y frecuencia de corte) han sido 74 días, 73 días y 0'05, respectivamente.

El análisis correlatorio y espectral de los caudales diarios del manantial de Villanueva del Rosario proporciona un correlograma poco tendido (Fig. 3E), con un efecto memoria de 65 días. En cuanto al espectro de frecuencias (Fig. 3F), la frecuencia de corte es de 0'06 y el tiempo de regulación es de 54 días.

En el manantial de Ojén, la aplicación de esta metodología en el dominio temporal da lugar a un correlograma tendido (Fig. 3G) y un efecto memoria de 96 días. El análisis espectral (Fig. 3H), permite obtener una frecuencia de corte 0'09. Además, la

duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre el sistema (tiempo de regulación) es de 68 días.

Por último, la aplicación del ACE a la serie de caudales semanales de los manantiales de Torremolinos muestra un correlograma muy tendido (Fig. 3I), con un efecto memoria del orden de 160 días. Este comportamiento muy inercial es corroborado por los resultados obtenidos en el dominio frecuencial (Fig. 3J), ya que tanto el valor de la frecuencia de corte (0'03) como el tiempo de regulación (94 días) reflejan una alta capacidad de filtro del sistema.

## Discusión de los resultados

A partir del análisis realizado a las series de caudales de los manantiales que drenan diferentes acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética occidental obtenemos los siguientes resultados:

El sector nororiental de la Sierra de Líbar drenado, en parte, por el manantial de la Cueva del Gato, se caracteriza por la existencia de una alta karstificación funcional puesta de manifiesto por la relación entre las medias de los caudales máximos y mínimos, con un hidrograma que presenta varias crecidas al año de forma puntiaguda y estrecha como respuesta a las precipitaciones. Se trata de un sistema kárstico, con una alta velocidad de infiltración, corta duración de la decrecida por lo que la zona no saturada tiene poca participación en el caudal del manantial. La infiltración rápida del agua de lluvia origina procesos de dilución en el agua almacenada en el acuífero, tal como pusieron de manifiesto Jiménez *et al.* (2003). El agotamiento del manantial es relativamente rápido.

El acuífero de la Sierra de Líbar presenta el efecto memoria y el tiempo de permanencia más bajos de los sistemas estudiados. Sin embargo, los valores de ambos parámetros evidencian un comportamiento inercial tal como pusieron de manifiesto Benavente y Mangin (1984) para quienes este acuífero se comporta como un sistema capacitivo poco transmisor en el que se producen respuestas de transmisión rápida originadas por la infiltración de escorrentía superficial del río Gaduares.

El análisis de la curva de recesión para el manantial de La Villa, principal punto de drenaje del Torcal de Antequera proporciona para este acuífero prácticamente los mismos resultados que los obtenidos para la Sierra de Líbar, sólo difiere en que, en este caso, es inferior la relación entre las medias de los caudales máximos y mínimos y el hidrograma presenta un menor número de crecidas al año. Las diferencias pueden estar, en parte, influenciadas por los bombeos que se realizan para su regulación. Se debe

destacar que, en comparación con la Sierra de Líbar, el Torcal presenta una menor participación de la zona no saturada en la descarga del manantial y un mayor poder regulador. Además, el Torcal de Antequera constituye un acuífero con una alta inercia y un tiempo de regulación bastante largo (Mangin, 1982; Mangin y Pulido, 1983; Pulido, 1993) parámetros que presentan valores más altos que los que caracterizan a la Sierra de Líbar.

El sector meridional de la Sierra Blanca, drenado por el manantial de Ojén tiene características hidrodinámicas similares a las mencionadas para la Sierra de Líbar y el Torcal, aunque la relación entre las medias de los caudales máximos y mínimos es menor que en el primero de los acuíferos citados y el efecto memoria y tiempo de residencia son más altos que en el Torcal de Antequera, lo que indica una mayor inercia. Andreo (1997) puso de manifiesto el importante grado de karstificación funcional de este sistema en el que infiltración rápida del agua de lluvia origina una disminución de la temperatura y una dilución del agua almacenada en el acuífero.

La Sierra de Camarolos drenada, en parte, por el manantial de Villanueva del Rosario, tiene un comportamiento kárstico, con un agotamiento rápido y escaso poder regulador. La principal diferencia con respecto a los acuíferos citados anteriormente es el mayor tiempo de la decrecida, o menor velocidad de infiltración, lo cual está en concordancia con el menor desarrollo del modelado kárstico. También existe un mayor tiempo de influencia de la zona no saturada en la descarga del manantial. El efecto memoria y el tiempo de regulación son relativamente altos lo que pone de manifiesto la inercia del acuífero.

El acuífero de la Sierra de las Cabras, cuyo principal punto de descarga es el manantial de El Tempul, es de tipo fisurado con una baja organización del drenaje kárstico (Jiménez *et al.*, 2001). En el hidrograma del manantial se registra una crecida importante por cada año hidrológico con una relación entre las medias de los caudales máximos y mínimos relativamente baja, por lo que el drenaje de la zona no saturada es lento. La decrecida tiene una gran duración, con una baja velocidad de infiltración, por lo que la zona no saturada tiene una alta participación en el drenaje del manantial. El agotamiento se produce también de forma lenta y tiene una gran inercia y un alto poder regulador.

El sector oriental de la Sierra de Mijas, drenado por los manantiales de Torremolinos, que actualmente están regulados por bombeos, es también de tipo fisurado o poco karstificado (Andreo, 1997). El hidrograma conjunto de los manantiales muestra una sola



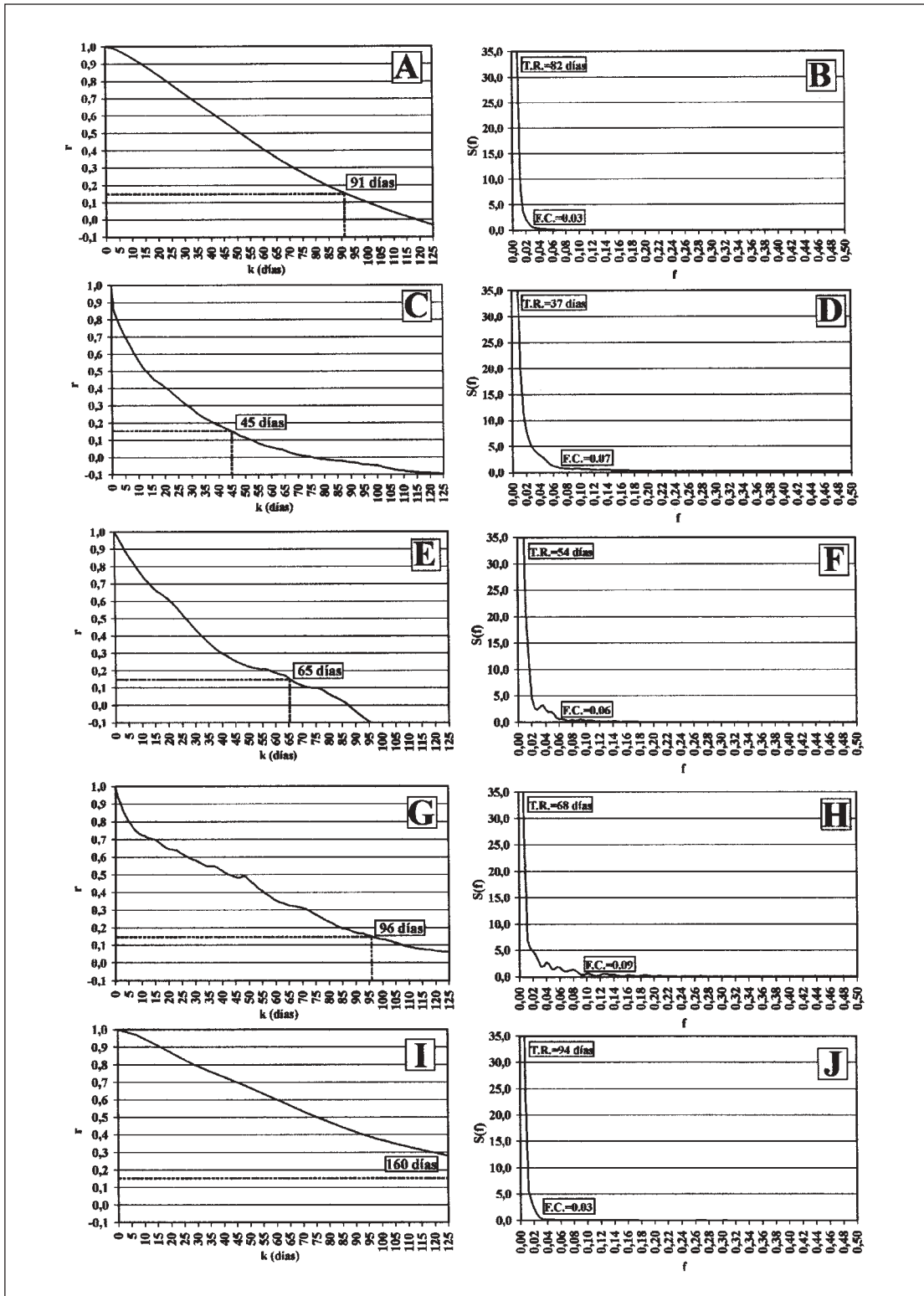


Fig. 3. Correlogramas y espectros simples de caudales para cada una de las surgencias estudiadas, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda:  $r$  coeficiente de correlación,  $S(f)$  espectro de frecuencia ( $f$ ), T.R. tiempo de regulación, F.C. frecuencia de corte. Los valores de estas funciones se han obtenido a partir de las fórmulas de Jenkins y Watts (1968) y Mangin (1984, 1994)

Fig. 3. Correlograms and spectrums of the variance of the outflow series for analyzed springs. A 125 days window and 1 day step. Legend:  $r$  correlation coefficient,  $S(f)$  frequency spectral ( $f$ ), T.R. regulation time, F.C. truncation frequency. Values for this functions have been obtained with Jenkins and Watts (1968) and Mangin (1984, 1994) equations

crecida al año, de gran anchura y punta poco marcada. La relación entre las medias de los caudales máximos y mínimos es muy baja, de tal manera que la media de los caudales máximos no llega a duplicar a la media de los caudales mínimos. La decrecida tiene igual duración que en el sistema anterior lo que traduce una velocidad de infiltración muy lenta, junto con una importante participación de la zona no saturada en la descarga. El agotamiento se realiza de manera lenta, propio de sistemas poco karstificados con flujo de tipo difuso. Tiene el comportamiento más inercial de los sistemas estudiados y un alto poder regulador, puesto de manifiesto por la importante explotación mediante bombeos que se están realizando en este sector de la Sierra de Mijas.

Los manantiales de Torremolinos presentan un valor de  $k$  inusual para acuíferos carbonáticos ( $k \approx 12$ ), no contemplado en la clasificación de Mangin (*op. cit.*), en la cual alcanza un valor máximo de 1. El hecho de que el valor del parámetro  $k$  sea mayor que la unidad se debe a que el volumen almacenado en la zona saturada o volumen dinámico (cuya variación determina los caudales de la surgencia durante el agotamiento) es superior al volumen emitido por los manantiales durante un ciclo medio (volumen de tránsito), aspecto que ya ha sido puesto de manifiesto por diferentes autores (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1990; Moral, 1992 y Andreo, 1997).

## Conclusiones

Mediante el análisis de la respuesta hidrodinámica de los principales manantiales, que drenan diferentes acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética occidental, se pueden establecer un primer grupo de acuíferos que presentan un alto grado de karstificación funcional y de jerarquización de los conductos, en los que la recarga se produce de una manera rápida y de la misma forma tiene lugar el agotamiento; además, los manantiales que drenan estos sistemas tienen importantes diferencias entre los caudales máximos y mínimos, indicativos de que su poder regulador es bajo. Al grupo de acuíferos que aglutinan todas estas características se le ha definido como "acuíferos carbonáticos con karstificación funcional". No obstante, a la vista de los resultados obtenidos, dentro de este grupo existen algunas diferencias, ya que todos los acuíferos no presentan igual comportamiento, especialmente en lo que se refiere al efecto memoria o a su poder de regulación. Estos parámetros son bajos en uno de los acuíferos (Sierra de Líbar) que se puede clasificar como "acuífero carbonático con elevada karstificación funcional" y más elevados en otros,

(Torcal de Antequera, Sierra de los Camarolos y Sierra Blanca) por lo que se puede formar un segundo grupo de "acuíferos carbonáticos con moderada karstificación funcional".

En cambio, los acuíferos de la Sierra de las Cabras y de Torremolinos (Sierra de Mijas) se definen por un efecto memoria, poder regulador y capacidad de filtro altos. También, a diferencia de los acuíferos anteriores, la relación entre los valores medios de los caudales máximos y mínimos es baja, así como una velocidad de infiltración lenta al igual que los períodos de agotamiento y, por tanto, indicativo de un bajo grado de karstificación funcional y de jerarquización de los conductos. Todas estas características son propias de acuíferos de flujo difuso, con un comportamiento próximo al de "acuíferos carbonáticos fisurados sin karstificación funcional".

## Agradecimientos

El presente trabajo se enmarca en el Convenio de Colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga y constituye una contribución a los proyectos PB98-1397 de la DGICYT, REN2002-01797/HID de la DGI, REN2003-01580/HID de la DGI e IGCP 448 de la UNESCO, así como al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía.

## Referencias

- Andreo, B. 1997. *Hidrogeología de acuíferos carbonáticos en las Sierras Blanca y Mijas*. SPUMA-CHS, 489 p, Málaga.
- Andreo, B., Carrasco, F. y Cruz-Sanjulián, J.J. 1992. Contribución al conocimiento hidrodinámico del sistema carbonatado drenado por el manantial de Coín (Málaga). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 15, 775-782.
- Antigüedad, I. 1986. *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Nervión-Ibaizábal. Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos*. Tesis Doct. Univ. País Vasco, 338 p. y anexos.
- Antigüedad, I., Ibarra, V. y Morales, T. 1988. Tipología de sistemas acuíferos kársticos de Vizcaya a partir del análisis correlatorio y espectral. *IV Simposio de Hidrogeología*, 331-344.
- Benavente, J. y Mangin, A. 1984. Aplicación del análisis de series de tiempo al sistema espeleológico Hundidero-Gato. *I Congreso Español de Geología*, 3, 541-553.
- Carrasco, F., Jiménez, P., Andreo, B., López Chicano, M., Marín, A., Liñán, C. y Vadillo, I. 2001. Estudio comparativo preliminar del funcionamiento hidrogeológico de varios acuíferos carbonatados de la Cordillera Bética. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 23, 381-391.

- Cruz-Sanjulián, J.J., Ibarra, V. y Morales, T. 1987. Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio del hidrograma del manantial de Olalde (Vizcaya). *Geolís*, 1, 50-61.
- Cruz-Sanjulián, J.J., Benavente, J., Moral, F., Martínez, J.C., López-Geta, J.A., Rubio Campos, J.C., Aragón, R. y Peinado, T. 1990. *Investigación de acuíferos carbonáticos (Sierras de Cazorla y Segura)*. Universidad de Granada-ITGE, 235 p.
- Cruz-Sanjulián, J.J., García-Latorre, F. e Ibarra, V. 1986. Delimitación del sistema kárstico del manantial de Iturriotz (Trucios, Vizcaya): Su caracterización a partir del análisis del hidrograma. *Boletín Geológico y Minero*, 97, 782-792.
- Chauve, P. 1960-62. Structure Géologique de la Région Centrale de la Province de Cadix (España). *Memories hors de série de la Societe Geologique de France*, 1, 257-264.
- Diputación Provincial de Málaga 1988. Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga, 151 p.
- Esteller, M.V., Morell, I., Antigüedad, I y Garay, P. 1996. Comportamiento del sistema kárstico drenado por el manantial de Sant Josep (Vall d'Uixó, Castellón). *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 381-398.
- Freixes, A., Monterde, M., Morín, J.P. y Ramoneda, J. 1996. Recursos hídricos e implicaciones ambientales del sistema de Aigüera (Val d'Aran). *Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 53-71.
- Garay, P. 2000. *El dominio triásico Espadán-Calderona. Contribución a su conocimiento geológico e hidrogeológico*. Tesis Doct. Univ. València.
- Garay, P. 2002. Tipología de acuíferos kársticos basada en el análisis de correlación y espectral de sus descargas naturales: una propuesta de revisión y ampliación de la Clasificación de Mangin. En Carrasco, F., Durán, J.J. y Andreo, B. (Eds). *Karts and Environment*, 99-104.
- Ibarra, V., Cruz-Sanjulián, J.J. y García-Latorre, F. 1987. Análisis correlatorio y espectral del manantial de Iturrioz (Vizcaya): El sistema del Barranco de Peñalba como ejemplo de un tipo de karst de características mixtas. *Estudios Geológicos*, 43, 241-248.
- Jiménez, P., Andreo, B., Durán, J.J., Carrasco, F., López-Geta, J.A., Vadillo, I. y Vázquez, M. 2001. Estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz, Sur de España). *Boletín Geológico y Minero*, 2, 85-101.
- Jiménez, P., Carrasco, F., Andreo, B., Durán, J.J. y López-Geta, J.A. 2002. Caracterización de acuíferos carbonáticos del sur de España a partir de su respuesta hidrodinámica. En Carrasco, F., Durán, J.J. y Andreo, B. (Eds). *Karts and Environment*, 105-113.
- Jiménez, P., Andreo, B. y Carrasco, F. 2003. Análisis de la descarga del Sector Nororiental de la Unidad Hidrogeológica de Líbar (Provincias de Málaga y Cádiz, Sur de España). *I Jornadas Luso-Españolas As Águas Subterrâneas no sul da Península Ibérica*, Faro (Lisboa), in press.
- López Chicano, M. 1992. *Hidrogeología del acuífero kárstico de Sierra Gorda*. Tesis Doct. Univ. Granada. 429 p. y anexos.
- Mangin, A. 1970. Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Annales Spéléologie*, 25 (3), 581-610.
- Mangin, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques (I). Thèse Doctorat Sciences Naturelles, Dijon, France. *Annales de Spéléologie*, 29 (3), 283-332.
- Mangin, A. 1981 a. Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 293, 401-404.
- Mangin, A. 1981 b. Apports des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 293, 1011-1014.
- Mangin, A. 1882. L'approche systemique du karst, consequences conceptuelles et methodologiques. *Reunión monográfica sobre el karst*. Larra, 141-157.
- Mangin, A. 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67, 25-43.
- Mangin, A. y Pulido, A. 1983. Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio de acuíferos kársticos. *Tecniterrae*, 51, 53-65.
- Martín Algarra, A. 1987. *Evolución geológica Alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental)*. Tesis Doct., Univ. Granada, 1171 p.
- Morales, T. 1992. Caracterización del sistema kárstico de Argin a partir del análisis de respuestas naturales del manantial. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 15, 741-758.
- Obartí, F.J. 1987. *El análisis de sistemas aplicado a la Hidrogeología kárstica*. Tesis Lic. Univ. Granada. 230 p.
- Padilla, A. 1990. *Modelos matemáticos aplicados al estudio de acuíferos kársticos*. Tesis Doct. Univ. Granada, 267 p.
- Padilla, A. y Pulido, A. 1995. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology*, 168, 73-89.
- Pulido-Bosch, A. 1979. *Contribución al conocimiento de la hidrogeología del Prebético Nororiental (provincias de Valencia y Alicante)*. Tesis Doct. Univ. Granada, 410 p.
- Pulido, A. 1993. The karstic aquifer of the Torcal de Antequera (Málaga). En A. Pulido (Ed.) *Some Spanish Karstic Aquifers*, 37-49.

Recibido: diciembre 2003

Aceptado: mayo 2004