

Estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz, Sur de España)

P. Jiménez⁽¹⁾, B. Andreo⁽¹⁾, J.J. Durán⁽²⁾, F. Carrasco⁽¹⁾,
J.A. López-Geta⁽²⁾, I. Vadillo⁽¹⁾ y M. Vázquez⁽²⁾

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

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

RESUMEN

Se ha llevado a cabo un estudio hidrodinámico del acuífero carbonatado de la Sierra de las Cabras, a partir de series históricas de datos en el manantial de El Tempul, principal punto de descarga natural del sistema, y de datos de precipitación registrados en estaciones próximas. La aplicación del análisis correlatorio y espectral a estas series de datos ha permitido constatar que el acuífero tiene una gran inercia y un elevado poder regulador o capacidad de modular la distribución aleatoria de las precipitaciones. El análisis de las curvas de recesión correspondientes a varios hidrogramas unitarios muestran que la decrecida se produce de forma lenta, probablemente debido al importante espesor de la zona no saturada y a la baja organización del drenaje kárstico que ésta presenta. El agotamiento se produce también lentamente; tal es así que durante éste se drena menos de la mitad del agua que podría drenarse por el manantial de El Tempul. A partir del análisis de caudales clasificados se ha constatado que, cuando el caudal es inferior a 75 L/s el manantial está en agotamiento, y que por encima de 900 L/s se producen descargas por manantiales de tipo "trop-plein". Finalmente, se han estimado los recursos medios anuales del sistema en 8-9 hm³, equivalentes a la tercera parte del agua de lluvia que cae sobre la superficie permeable del acuífero, y las reservas, que han resultado ser de 20 hm³. El tiempo medio de residencia del agua en el acuífero es superior a 2 años.

Palabras clave: acuífero carbonatado, análisis correlatorio y espectral, Cádiz, curva de recesión, hidrodinámica

Hydrodynamic study of El Tempul spring (Sierra de las Cabras, Cádiz province, southern Spain)

ABSTRACT

A hydrodynamic study of the Sierra de Cabras carbonate aquifer has been done by using large time series of outflow data from El Tempul spring, the main natural discharge point of this system, and rainfall time series in the surroundings stations. The application of correlation and spectral analyses to these large time series has shown that this aquifer presents a great inertial behaviour and also a great regulation capacity, therefore, a high modulation capacity of the random distribution for precipitation. Analysis of recession curves belonging to different unit hydrographs shows that depletion is a slow process, probably due to the high thickness of the vadose zone and to a scarce organization of the karstic drainage. Depletion period is also produced very slowly, in such a way that less than half of the total volume of water that could be drained by the El Tempul spring flows out during this period. By way of the sorted discharge method is deduced that when the discharge is below 75 L/s, the spring is in the depletion period, and above 900 L/s the discharge is produced as "trop-plein" springs. Finally, the mean annually resources of this system has been estimated in 8-9 hm³, that is, one-third of the rainfall that falls in the permeable area of the aquifer. The reserve have been also calculated in 20 hm³. The mean residence time of the water in the aquifer is more than 2 years.

Key words: Cádiz, carbonate aquifer, correlation and spectral analyses, hydrodynamic, recession curve

Introducción

El acuífero de la Sierra de las Cabras está situado en la parte central de la provincia de Cádiz y comprende las sierras del Valle, de Dos Hermanas, de la Sal, de las Cabras y de la Loma del Tempul, nombradas de

Oeste a Este (Fig. 1). Todos estos relieves configuran una alineación montañosa de 42 km² de extensión, cuya forma en planta es de medialuna con la concavidad abierta hacia el Suroeste. La Sierra de las Cabras es atravesada por dos cauces fluviales: el arroyo de Bogaz, también llamado Boca de Foz, en la

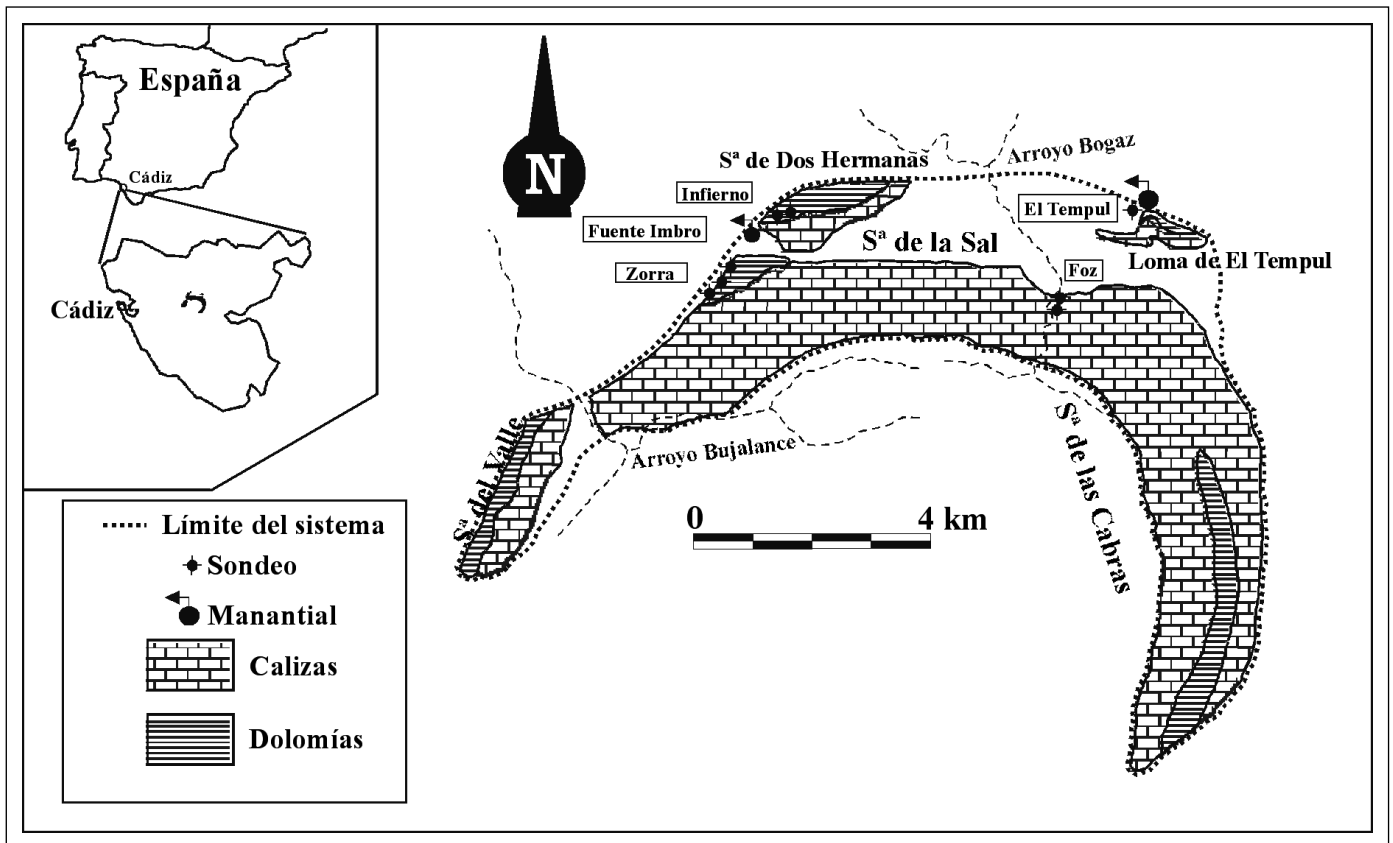


Fig. 1. Localización geográfica del área de estudio
 Fig. 1. Geographical location of the study area

parte oriental, y el arroyo de Bujalance en la parte occidental. Los valores medios anuales de precipitación y temperatura en el área de estudio son, respectivamente, 825 mm y 17,3 °C.

La Sierra de las Cabras es un acuífero de gran interés puesto que su principal punto de descarga (manantial de El Tempul) ha constituido, históricamente, la fuente de abastecimiento de agua a Jerez de la Frontera (Cádiz). Un adecuado conocimiento de su funcionamiento hidrogeológico permitiría mejorar la gestión de sus recursos hídricos. Ello redundaría en beneficio del abastecimiento de la Bahía de Cádiz, un área donde la demanda de agua es elevada y, además, presenta importantes variaciones estacionales (mayor demanda en verano que en invierno), de forma análoga a lo que ocurre en otras áreas costeras en las que la actividad turística es uno de los pilares económicos. Los períodos de sequía que tienen lugar en esta región del Sur de España dificultan, aún más si cabe, la gestión de los recursos hídricos disponibles.

En el área de estudio se dispone de series de datos temporales de precipitación en dos estaciones pluviométricas (Gibraltar y Real Observatorio de San Fernando) y de caudales en la estación de aforos del manantial de El Tempul, gracias a la labor desempeñada por el personal de varios organismos y entidades privadas. La longitud o duración de estas series de datos abarca varias décadas, en algunos casos más de un siglo, y la periodicidad de medida ha sido mensual y diaria. Se dispone, así, de series de datos excepcionalmente largas, que son susceptibles de ser tratadas mediante diferentes técnicas o métodos de análisis de series temporales.

El principal objetivo de este trabajo es caracterizar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero carbonatado de Sierra de las Cabras a partir del estudio de su respuesta natural (caudales del manantial de El Tempul) ante las precipitaciones. Adicionalmente se pretende realizar una estimación de los recursos y reservas de agua almacenadas en el acuífero. Conocer cómo funciona el acuífero y determinar los

volúmenes de agua existentes son cuestiones fundamentales para un mejor aprovechamiento y gestión de los recursos hídricos.

Metodología

El presente trabajo ha consistido, sobre todo, en la aplicación de diferentes metodologías a las series temporales de datos (de caudales y precipitaciones) previamente recopiladas. En concreto, los métodos utilizados han sido: análisis correlatorio y espectral, análisis de hidrogramas (curva de recesión) y análisis de caudales clasificados. Un resumen de los fundamentos de estos métodos se puede encontrar en Mangin (1994) y aplicaciones conjuntas de los mismos en varios trabajos de investigación: Antigüedad (1986), Obartí *et al.* (1988), Padilla (1990), Morales (1991), López-Chicano (1992), Andreo (1997), Cardoso da Silva, (1997), Ramoneda *et al.* (1999).

El análisis correlatorio y espectral considera la totalidad de la serie de datos disponible y se puede aplicar en el dominio temporal (análisis correlatorio) y en el dominio de las frecuencias (análisis espectral). Este método fue desarrollado con fines inferenciales (Jenkins y Watts, 1968) y ha sido puesto a punto y utilizado para el estudio de los sistemas kársticos por Mangin (1981a y b; 1984). En las referencias bibliográficas antes citadas se puede encontrar todo el fundamento matemático de esta metodología que ha sido aplicada en muchos acuíferos carbonatados: en el Pirineo francés (Mangin, 1981a y b; 1984) y más al norte (Larocque *et al.*, 1998), Jura suizo (Eisenlohr, 1995), País Vasco (Antigüedad *et al.*, 1988; Ibarra *et al.*, 1987; Cruz Sanjulián *et al.*, 1987), Cordillera Bética (Mangin y Pulido-Bosch, 1983; Benavente y Mangin, 1984; Benavente *et al.*, 1985; Padilla y Pulido-Bosch, 1995; Andreo *et al.*, 1996), por citar sólo algunos ejemplos.

La aplicación del análisis correlatorio y espectral a series de datos de lluvia y de caudales, tanto de forma simple como cruzada, permite identificar la estructura y componentes de dichas series de datos. A partir de éstas se obtiene información del comportamiento del sistema carbonatado 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. En cualquier caso, la información sobre la estructura de la serie no es válida más que para el período comprendido entre el doble del paso de tiempo considerado y el tercio de la longitud de la serie, lo que se denomina ventana de observación (Mangin, 1984). Tanto el análisis correlatorio como el espectral se realizan a

dos niveles: "corta duración" (ventana de observación de 125 días y paso de un día) para detectar las tendencias interanuales y "larga duración" (ventana de observación de 1.250 días y "paso" de 10 días) para detectar las tendencias interanuales.

El hidrograma de manantiales que drenan acuíferos carbonatados ofrece la posibilidad de estimar la importancia relativa de la red kárstica y de los bloques capacitivos en el acuífero drenado. Aunque la forma del hidrograma resulta en ocasiones suficientemente expresiva, un método de trabajo más riguroso aconsejaría utilizar alguno de los diversos modelos disponibles. Esto exige verificar previamente que el hidrograma en cuestión se ajusta el modelo elegido, de modo que los parámetros obtenidos experimentalmente cumplen las expresiones matemáticas en que se basan tales modelos (ver síntesis en Pulido-Bosch, 1987). El método de Mangin (1970, 1975) es el más aceptado y el que más se ha utilizado (Cruz Sanjulián *et al.*, 1986; Antigüedad, 1986; Padilla, 1990; Andreo *et al.*, 1992, entre otros muchos ejemplos), porque fue desarrollado específicamente para acuíferos kársticos y porque tiene en cuenta toda la curva de recesión, es decir, la parte decreciente del hidrograma comprendida entre la punta de la crecida y el final del agotamiento. 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).

La curva de caudales clasificados de un manantial representa el porcentaje de días del período considerado en los que el caudal tiene un valor igual o inferior a un dado. Por tanto, expresa la regularidad o irregularidad de los caudales de un manantial, es decir la frecuencia con la que se presenta un determinado caudal (Custodio y Llamas, 1976). Al dividir dicha frecuencia por el número de días considerados, se obtiene la probabilidad de que se produzca un caudal cualquiera. La ley de probabilidad que mejor se ajusta a la distribución de frecuencias de los caudales es, según Mangin (1971, 1975), una que se deriva de la de Laplace.

El caudal de los manantiales que drenan acuíferos carbonatados puede estar condicionado por la existencia de varias formas de circulación dentro del propio acuífero. El análisis de caudales clasificados es un método interesante para poner de manifiesto la actuación de fenómenos de circulación de diferente naturaleza a partir de la existencia de correlación en

la ocurrencia de caudales de distinta magnitud. Aparte de los acuíferos estudiados por Mangin (1975), esta metodología ha sido aplicada también en bastantes trabajos (García-Latorre *et al.*, 1987; Padilla, 1990 y Andreo, 1997, por ejemplo).

Por lo que respecta a la estimación de los recursos y reservas de agua almacenados en el acuífero de Sierra de las Cabras, se han llevado a cabo mediante técnicas convencionales de balances hidrogeológicos y de estimación de parámetros hidráulicos de acuíferos, a partir de datos de precipitaciones, de caudales de descarga (a través de manantiales y de bombeos) y de piezometría.

Marco geológico e hidrogeológico. Antecedentes

Los materiales que constituyen la Sierra de las Cabras pertenecen a la unidad del mismo nombre, dentro del dominio Subbético Medio de la Zona Externa de la Cordillera Bética (Chauve, 1960-62; Martín Algarra, 1987; ITGE, 1990). La serie estratigráfica de dicha unidad está constituida por 3 conjuntos litológicos principales: uno inferior, de edad triásica en facies germano-andaluza (Keuper); uno medio, de 300 metros de espesor y naturaleza calcáreo-dolomítica, de edad fundamentalmente jurásica, y otro superior, de carácter calcáreo-arcilloso, de edad cretácico-terciario.

La estructura geológica del área de estudio está formada por pliegues anticlinales y sinclinales que presentan una forma arqueada en cartografía y que han sido afectados por una tectónica de fractura posterior. En la parte meridional hay una estructura anticlinal que constituye los relieves de Sierra del Valle, Sierra de la Sal y Sierra de las Cabras, en cuyo núcleo afloran principalmente los materiales carbonatados jurásicos. Únicamente en la parte central de la Sierra del Valle afloran los materiales del Trías. Hacia el Norte la estructura está formada por un sinclinal ocupado por materiales cretácicos, bajo los cuales deben encontrarse las calizas y dolomías jurásicas, que afloran inmediatamente al norte (Sierra de Dos Hermanas y Loma de El Tempul) formando parte del flanco meridional del siguiente anticlinal.

Las calizas y dolomías del Jurásico constituyen un acuífero cuya alimentación se produce por infiltración directa de las precipitaciones caídas sobre los afloramientos de este tipo de rocas y, eventualmente, por infiltración de parte de la escorrentía que circula por los arroyos de Bujalance y Bogaz, arroyos que se encuentran normalmente secos y con sus cauces colgados del orden de 30 metros o más sobre la zona saturada del acuífero. En el Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz (DPC, 1985) se estimaron los

recursos medios del sistema en 5,5, hm³/año, procedentes exclusivamente de las precipitaciones.

La descarga se produce, de modo natural, por el manantial de El Tempul, a la cota 120 m s.n.m., cuyo caudal varía entre unos 20 L/s y menos de 2000 L/s, con un valor medio histórico de 283 L/s. En épocas de recarga excepcional entra en funcionamiento el "trop plein" de Fuente Imbro (Fig. 1), situado en la cabeceira del arroyo del Infierno (Sierra de Dos Hermanas) a la cota de 140 m s.n.m. Existe, pues, un flujo subterráneo dirigido preferentemente hacia el manantial de El Tempul, con un gradiente hidráulico del orden del 7‰ (Carreras, 1996).

También se produce descarga por bombeo en algunos de los sondeos perforados durante la sequía de 1995 (Carreras, 1996; ITGE, 1996); todos ellos atraviesan un espesor saturado de acuífero mayor de 200 m, excepto en la vertical del manantial de El Tempul donde la potencia del acuífero es de unos 18 metros. Durante el período comprendido entre agosto de 1995 y marzo de 1996, 2 sondeos en la Boca de Foz, 3 en el arroyo de la Zorra y 3 en el arroyo del Infierno fueron instalados y puestos en funcionamiento, lo que permitió calcular valores de transmisividad comprendidos entre 10 y 104 m²/día (Carreras, 1996). Se bombeó un volumen superior a 6 hm³, con caudales continuos de hasta 900 L/s, y se produjo un descenso piezométrico del orden de 30 m, aunque habría sido mayor si no se hubieran registrado precipitaciones. El control de los volúmenes bombeados y de la piezometría permitieron estimar las reservas del acuífero en 0,2 hm³/m en los 29 m más someros de la zona saturada (Carreras, 1996). A partir de estos datos, en un informe del ITGE (1996) se calculó la porosidad drenable, que resultó ser del orden de 0,5 %.

Análisis correlatorio y espectral (ACE)

Análisis de la función de entrada

Se ha realizado un análisis simple (correlograma y espectro de frecuencias) de la serie de datos diarios disponibles correspondiente a dos estaciones pluviométricas: desde 1-1-1985 al 21-11-1999 en la estación de El Tempul y desde 1-1-1985 al 30-11-1995 en la estación del Real Observatorio de San Fernando, situado a 40 km al Oeste de la Sierra de las Cabras.

El correlograma de una serie de datos es la función de autocorrelación de una serie finita y pone de manifiesto la dependencia entre las observaciones de la serie para intervalos de tiempo cada vez más grandes; por tanto traduce el efecto memoria: el correlograma decrece tanto más rápido cuanto menos iner-

cial es el proceso que lo genera. El espectro de densidad de varianza, transformada de Fourier del correlograma simple, permite descomponer la varianza total de una serie en función de la frecuencia. El espectro permite, pues, detectar las diversas componentes (secular, estacional y aleatoria) comprendidas en la serie de datos.

El correlograma simple de corta duración, realizado con los datos de lluvia tomados a paso de tiempo diario en la estación de El Tempul, pone de manifiesto el carácter de función casi aleatoria pura de esta variable, con una marcada independencia de los valores entre sí (Fig. 2A). El efecto memoria, denominado por Mangin (1981a) como el valor de k (días) para $r = 0,1-0,2$, obtenido del correlograma, presenta un valor de 2 días. Es decir que la lluvia de un día no se pare-

ce nada a la lluvia caída dos días antes o dos días después. El correlograma de larga duración permite detectar únicamente la periodicidad anual en la distribución de las precipitaciones (Fig. 2B).

El espectro de densidad de varianza parece indicar periodicidades pluviométricas para ciclos menores, aunque es la periodicidad pluviométrica para el ciclo anual la más marcada, hecho éste que se deduce tanto de la tendencia observada en el análisis de corta como en la periodicidad que presenta el de larga duración (Figs. 2C y D). También se detecta otra componente periódica (semestral) y se insinúa una ligera tendencia interanual (aparentemente, cuatrianual) poco marcada.

Los resultados del análisis de los datos de la estación de San Fernando son parecidos a los anterior-

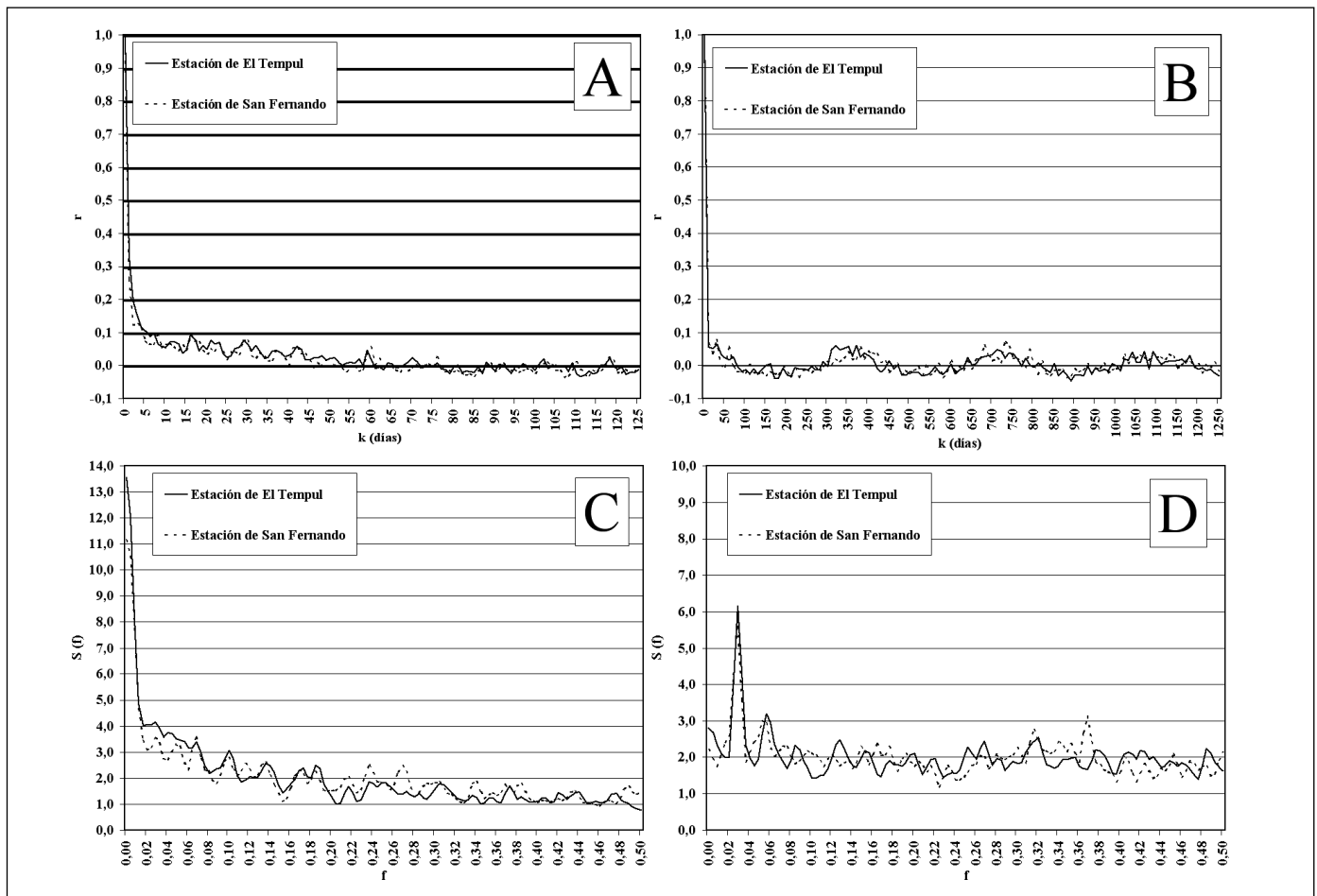


Fig. 2. Resultados del análisis correlatorio (A, B) y espectral (C, D) efectuado con datos pluviométricos diarios de las estaciones de El Tempul y San Fernando. Leyenda: r , coeficiente de correlación; $S(f)$, espectro de frecuencia (f). Los valores de estas funciones se han obtenido a partir de las fórmulas de Jenkins y Watts (1968)

Fig. 2. Results of correlation (A, B) and spectral analysis (C, D) using daily rainfall data from El Tempul and San Fernando stations. Legend: r , correlation coefficient; $S(f)$, frequency spectral (f). Values have been obtained by means of Jenkins and Watts (1968) equations

mente comentados (Figs. 2A a D). En el caso del correlograma simple a corto término, queda claro el carácter casi aleatorio de la variable lluvia, pues el efecto memoria es de 2 días. Análogamente, en el correlograma simple de larga duración queda reflejada la existencia de los ciclos anuales. En el espectro simple, al igual que en la serie de datos de El Tempul, se observa que la periodicidad pluviométrica anual es la más marcada, seguida de la componente semestral y, en este caso, es todavía menos marcada la tendencia plurianual dada la longitud más corta de la serie de datos.

Además del análisis de datos diarios se ha efectuado un análisis correlatorio y espectral de las series históricas de precipitaciones mensuales de Gibraltar (desde 1790 hasta 1979) y San Fernando (entre 1870 y 1997). Los correlogramas simples de las series de datos de ambas estaciones, tanto a corto como a largo término, ponen de manifiesto la existencia de ciclos anuales bien marcados (Fig. 3A). El espectro de densidad de varianza para ambas series históricas permite corroborar una periodicidad pluviométrica anual muy marcada y una semestral menos patente (Fig. 3B). No se detectan tendencias interanuales.

Por tanto, el análisis correlatorio y espectral de las series de datos de lluvia disponibles, independientemente de la estación pluviométrica considerada, pone de manifiesto que la periodicidad anual en la distribución de las precipitaciones ha sido una constante desde hace casi dos siglos, aunque se hayan detectado algunas periodicidades menores (semes-

tral, fundamentalmente), poco marcadas. A partir de los datos manejados no se advierte ninguna otra tendencia diferente a largo término que lleve a pensar en la existencia de un cambio en el régimen de precipitaciones en el área de estudio.

Análisis de la función de salida y análisis cruzado entrada-salida

La serie de datos relativa a la descarga del manantial de El Tempul se puede dividir en dos series bien diferenciadas:

- Serie histórica de caudales mensuales, desde junio de 1862 hasta diciembre de 1995, calculados a partir de las lecturas de altura de la lámina de agua en el vertedero principal de la estación de aforos. Las lecturas fueron realizadas los días 20 de cada mes y convertidas posteriormente en caudales mediante la aplicación de una curva de gastos (ITGE, 1996). El caudal del manantial de El Tempul varía entre 1951 L/s (Febrero de 1941) y 20 L/s (Diciembre de 1975), con un valor medio de 283 L/s.

- Serie de valores diarios de la altura de la lámina de agua en el vertedero de la estación de aforos y, por tanto, del caudal diario mediante la aplicación de la curva de gastos. Esta serie de caudales diarios comprende desde Enero de 1985 hasta Noviembre de 1999. El caudal medio del manantial durante este periodo es de 253 L/s.

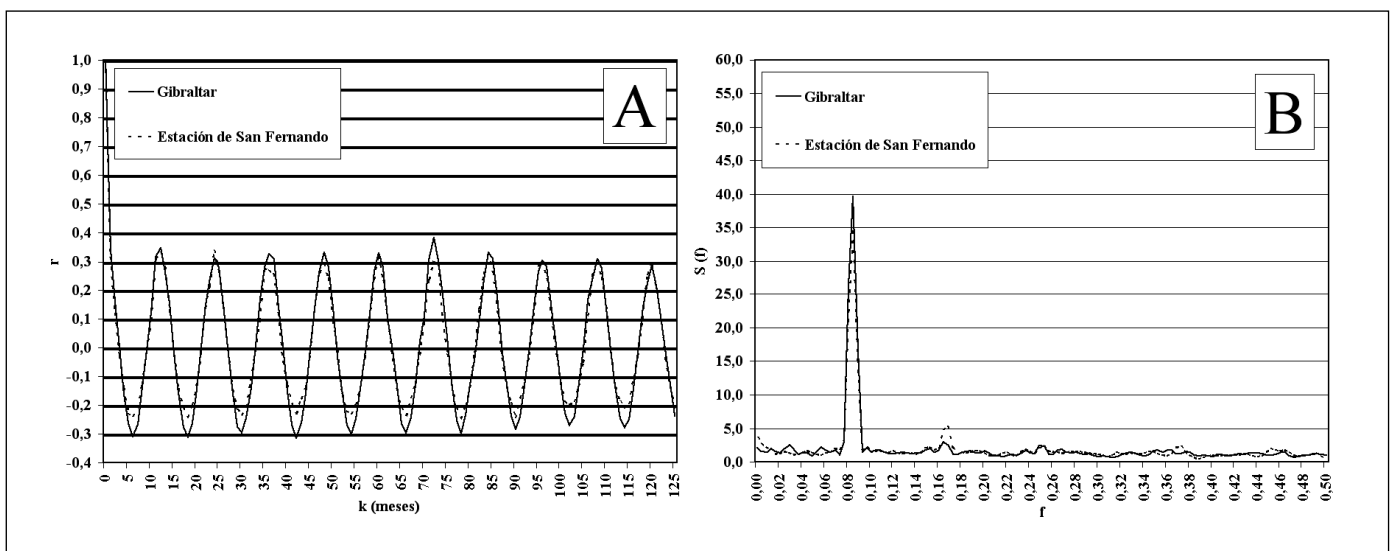


Fig. 3. Resultados del análisis correlatorio (A) y espectral (B) efectuado con datos pluviométricos mensuales de las estaciones de Gibraltar y San Fernando. Misma leyenda que la figura 2

Fig. 3. Results of correlation (A) and spectral analysis (B) using monthly rainfall data from Gibraltar and San Fernando stations. Same legend than figure 2

ACE con la serie de datos diarios de caudal

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral llevados a cabo con la serie de datos registrados entre 01/01/1985 y 30/11/1995. La señal de entrada corresponde a las precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de El Tempul y la de salida a caudales medios diarios en la estación de aforos del manantial de El Tempul. Teniendo en cuenta la periodicidad de los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser deducidos. Al igual que en el apartado anterior, el tratamiento se realiza a dos niveles: corta duración (ventana de observación de 125 días y paso de un día) y larga duración (ventana de observación de 1250 días y paso de 10 días).

El correlograma de la serie de caudales diarios del manantial de El Tempul es bastante tendido (Fig. 4A). Así, para el análisis de corta duración, el efecto memoria, que Mangin (1981a y b) definió como el valor de k (días) para $r = 0,1-0,2$, presenta en este caso un valor de 95 días. Mangin (1981a y b), indicó que cuanto mayor es el efecto memoria más importantes son las reservas de agua almacenadas en el acuífero. Así las reservas serían bastante abundantes en el acuífero de Sierra de las Cabras. No obstante, según otros autores (Sahuquillo *et al.*, 1987; Andreo, 1997) es preciso tener en cuenta datos adicionales al hidrograma, como la geometría o los parámetros hidráulicos del acuífero, para poder precisar la abundancia de reservas.

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; en este caso, la anchura de la banda es de 0,03 (Fig. 4B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 33 días, y por tanto, si se analiza el sistema con una periodicidad menor a ésta, teóricamente no se obtendrá información significativa. El espectro de densidad de varianza permite calcular, además, la duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre el sistema, a partir del parámetro denominado tiempo de regulación, que se define por $S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro para $f=0$. En el caso del manantial de El Tempul el tiempo de regulación es de 85 días. Este dato corrobora la interpretación efectuada anteriormente y refleja la importante capacidad de regulación del sistema.

El análisis a largo término ha permitido obtener un correlograma que refleja la existencia de ciclos anuales bien marcados (Fig. 5A). El espectro, para el análisis de larga duración (Fig. 5B), muestra un marcado ciclo anual, al igual que se observaba para las preci-

pitaciones, por tanto su origen es de naturaleza climática. Además, se observan dos componentes periódicas de 6 y 4 meses; la primera se ha detectado claramente en la señal de entrada, pero la segunda es menos marcada (Fig. 2D). También se insinúa la tendencia plurianual (probablemente cuatrianual) que se observa en el espectro de la serie de datos diarios correspondiente a la estación de El Tempul.

Aparte del análisis simple se ha llevado un análisis cruzado de los datos de caudal correspondientes al manantial de El Tempul y los datos de precipitación medidos en la estación próxima. Así, por ejemplo, la función de correlación cruzada representa la intercorrelación de dos series finitas, considerando una de ellas (lluvia) como causa de la otra (caudal). Por ello, el correlograma cruzado puede aportar una buena imagen de la respuesta impulsional del sistema. En este caso presenta una forma extendida, poco puntiaguda, con valores máximos del coeficiente de correlación de 0,202 para un valor de k de 28 días (Fig. 4C). Ello sugeriría una transmisión lenta de la señal de entrada, ya que se produce una importante amortiguación de la misma, probablemente debida a un escaso grado de karstificación de la potente zona no saturada. Todo esto conlleva un modelo de acuífero muy inercial, acorde con un importante poder regulador, ya deducido anteriormente a partir de los resultados del análisis simple. El correlograma cruzado de larga duración (Fig. 5C) muestra, una vez más, una ciclicidad anual muy marcada.

La función amplitud cruzada, tanto para el análisis de corta como de larga duración (Figs. 4D y 5D), muestra de forma clara el pico correspondiente a la componente anual, evidenciando la gran capacidad de filtro del sistema y las mismas componentes de 4 y 6 meses detectadas en el espectro simple, así como la tenue tendencia plurianual. Además, a partir de la función de fase se puede conocer el desfase medio existente entre la señal de entrada y la de salida para cualquier frecuencia, mediante la expresión $T = \theta(2\pi f)^{-1}$ (T = días, θ = radianes, f = frecuencia). Así, para sucesos de periodicidad anual el desfase medio es de unos 69 días.

Como se observa en la figura 4E, la coherencia sólo existe para las frecuencias bajas (0,7-0,8); es decir, las precipitaciones anuales son las que provocan variaciones más apreciables en el caudal del manantial. El análisis de larga duración corrobora, nuevamente el hecho de que este sistema sea algo lineal para el período anual y, en menor medida, para componentes de periodicidad 4 y 6 meses (Fig. 5E).

La capacidad reguladora del sistema queda perfectamente evidenciada en la fuerte atenuación que éste produce sobre las altas frecuencias en el gráfico

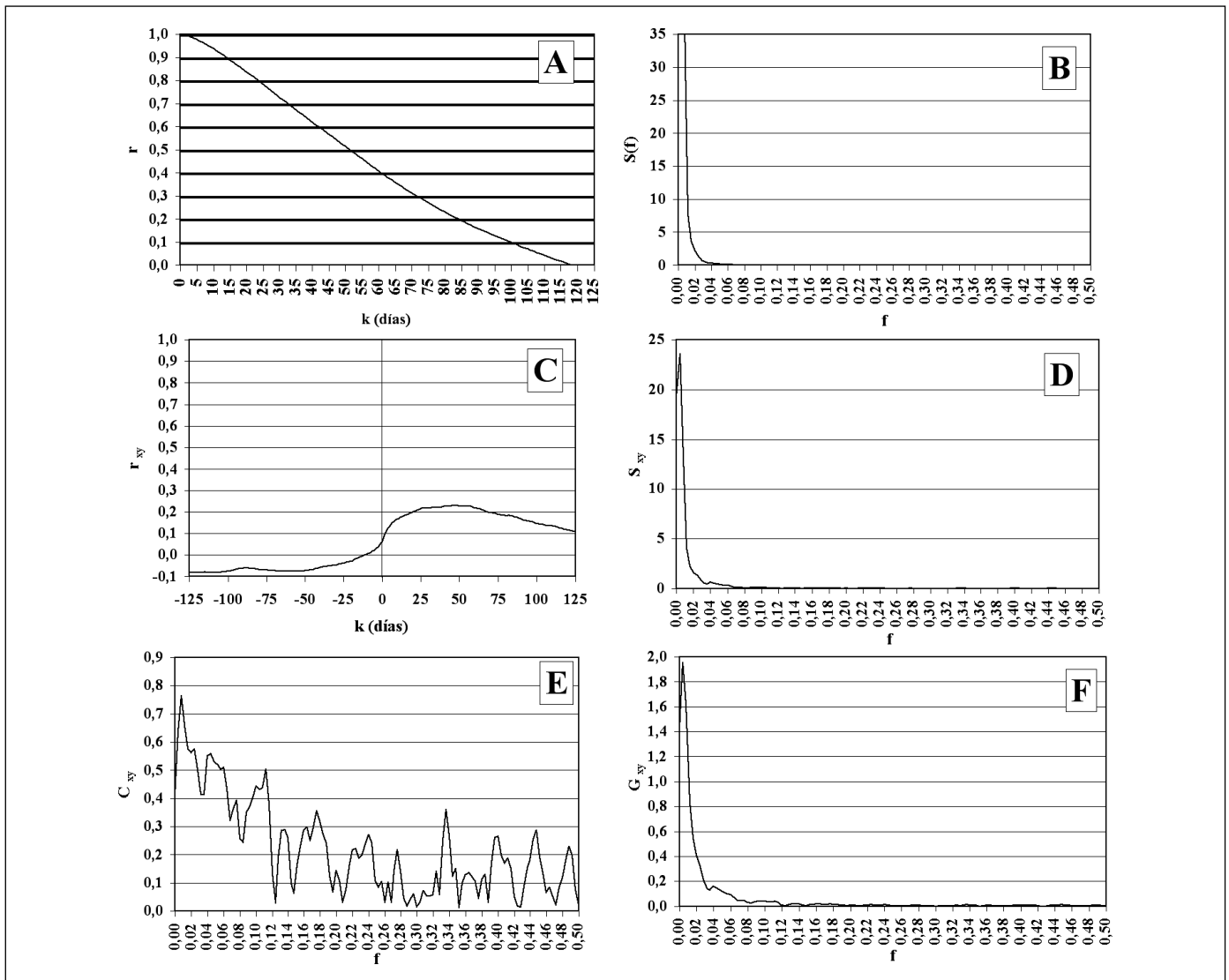


Fig. 4. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 1999, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: r coeficiente de correlación; $S(f)$, espectro de frecuencia; (f) , r_{xy} coeficiente de correlación cruzada; S_{xy} función de amplitud cruzada; C_{xy} función de coherencia; G_{xy} función de ganancia. Los valores de estas funciones se han obtenido a partir de las fórmulas de Jenkins y Watts (1968) y Mangin (1984, 1994)

Fig. 4. Results of correlation and spectral analysis using daily outflow data since 1985 to 1999 from El Tempul spring, for a 125 days window and 1 day step. Legend: r correlation coefficient; $S(f)$, frequency spectral; (f) , r_{xy} cross-correlation coefficient; S_{xy} , cross-amplitude function; C_{xy} , Coherence function; G_{xy} , Gain function. Values for this functions have been obtained by means of Jenkins and Watts (1968) and Mangin (1984, 1994) equations

de la función ganancia (Fig. 4F); únicamente la señal de entrada de la componente anual (bajas frecuencias) es claramente amplificada. Para el análisis de larga duración (Fig. 5F), aunque se insinúan ciertos picos para periodicidades menores a la anual (4 y 6 meses), e incluso para la tendencia plurianual, todas se atenúan considerablemente.

Se ha repetido el tratamiento del análisis correlatorio y espectral con datos semanales (tanto de preci-

pitación como de temperatura) obtenidos a partir de los datos diarios y los resultados obtenidos son bastante similares, aunque el trazado de los gráficos denota una menor precisión de los datos. En cualquier caso, este aspecto es interesante a la hora de llevar a cabo futuros muestreos periódicos en el manantial; así, probablemente con un muestreo semanal sea suficiente para obtener gran parte de la información.

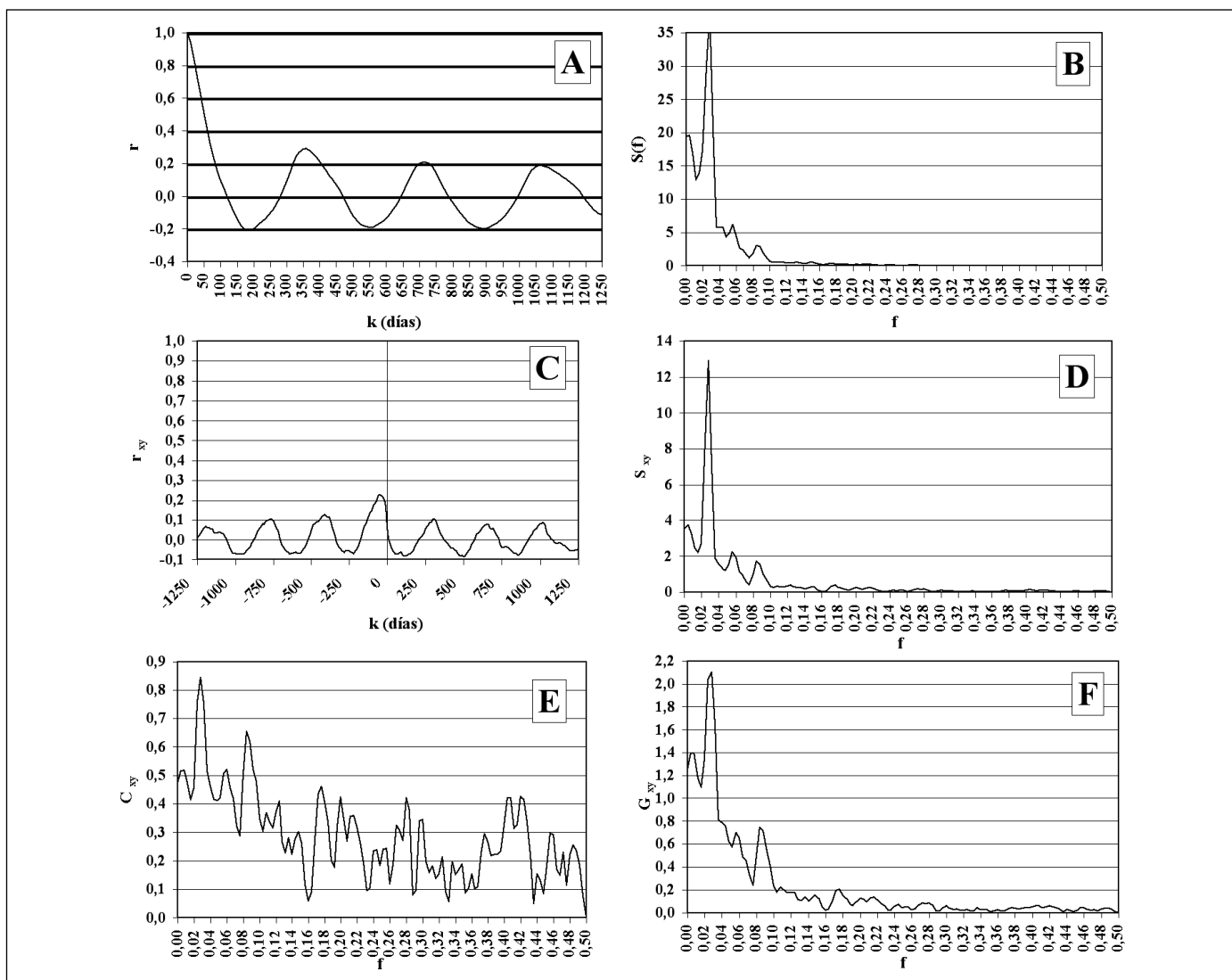


Fig. 5. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 1999, para una ventana de 1.250 días y paso de 10 días. Misma leyenda que la figura 4

Fig. 5. Results of correlation and spectral analysis using daily outflow data since 1985 to 1999 from El Tempul spring, for a 1.250 days window and 10 day step. Same legend than fig 4

ACE con la serie histórica de caudales mensuales

A continuación se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie histórica de caudales mensuales comprendida entre Octubre de 1862 y Diciembre de 1978 (1.395 datos, correspondientes a 116 años). La señal de entrada corresponde a las precipitaciones mensuales en la estación pluviométrica de Gibraltar y la de salida, a caudales medidos el día 20 de cada mes en la estación de aforos del manantial del Tempul. Por ello, teniendo en cuenta los datos empleados, no pueden ser deducidos fenómenos de periodicidad inferior a 2

meses y superiores a 40 años. En este caso, el análisis correlatorio y espectral se realiza únicamente a corto término: ventana de observación de 125 meses y paso de 1 mes.

El correlograma de las series de caudales mensuales del manantial de El Tempul muestra una ciclicidad anual bastante marcada (Fig. 6A). El efecto memoria es de 105 días, valor ligeramente superior al obtenido para el análisis de la serie diaria, pero que corrobora la gran capacidad de filtro del sistema.

En el dominio frecuencial se observa claramente el pico correspondiente a la tendencia anual en la distribución de las precipitaciones (Fig. 6B); además, se

detectan componentes periódicas de 4 y 2 años que no se observaban en la señal de entrada a nivel mensual. La frecuencia de corte presenta un valor de 0,1 y el tiempo de regulación es de 234 días. Estos datos sí difieren de los obtenidos para el análisis de la serie diaria y deben ser imputados a la menor precisión de los datos mensuales. No obstante, se corrobora la interpretación efectuada sobre la importante memoria y la gran capacidad de regulación del sistema.

Por lo que respecta al análisis cruzado entrada-salida, tanto el correlograma cruzado (dominio temporal) como la función amplitud cruzada (dominio de las frecuencias) permiten constatar la componente

anual de las precipitaciones y su incidencia en los caudales del manantial (Figs. 6C y D). Al igual que para el análisis de la serie de datos diarios, el desfase existente entre las señales de entrada y salida para sucesos de periodicidad anual es de 69 días.

A partir de la función de coherencia (Fig. 6E) se observan correlaciones relativamente altas para las frecuencias bajas, mostrando un importante comportamiento lineal para sucesos de periodicidad anual y, en menor medida, de periodicidad cuatrienal. La función de ganancia (Fig. 6F) muestra amplificación para sucesos cuya periodicidad es de 1 y 4 años, y atenuación en el resto de frecuencias.

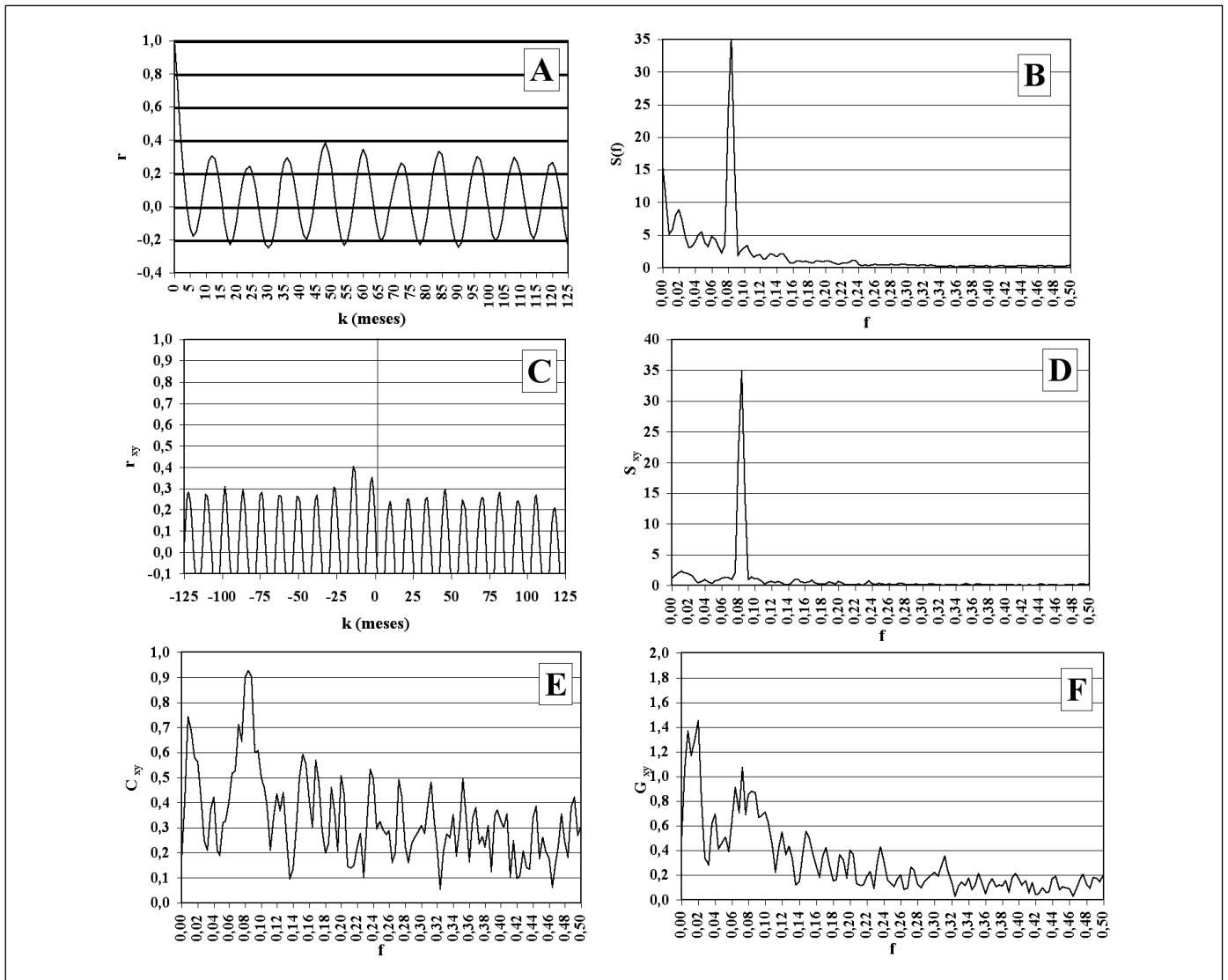


Fig. 6. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales mensuales drenados por el manantial de El Tempul entre 1862 y 1978, para una ventana de 125 meses y paso de 1 mes. Misma leyenda que las figuras 4 y 5

Fig. 6. Results of correlation and spectral analysis using monthly outflow data since 1862 to 1978 from El Tempul spring, for a 125 months window and 1 month step. Same legend than fig 4 and 5

Análisis de curvas de recesión

El estudio de la curva de recesión, es decir aquella que se extiende desde la punta de la crecida hasta el comienzo de la crecida siguiente, presenta un gran interés en el estudio de acuíferos carbonatados. 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 estudio 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.

A partir de la serie de datos diarios de la descarga del manantial del Tempul se ha llevado a cabo el estudio de 5 curvas de recesión (Fig. 7). En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de su análisis. Es preciso indicar que en todos los casos se trata de hidrogramas unitarios; no se han tenido en cuenta hidrogramas en los que se han producido crecidas (aunque sean de pequeña cuantía) durante la decrecida o el agotamiento.

Un primer análisis de la decrecida permite observar que la duración media de ésta (D_d) es aproximadamente de 170 días, variando poco de unos ciclos a

otros, excepto en el caso del año hidrológico 1986/87, que presenta una duración de 132 días. De este modo los valores del coeficiente de velocidad de infiltración ($\eta = 1/D_d$) están comprendidos entre 0,00758 días⁻¹ (año 1986/87) y 0,00538 días⁻¹ (1998/99), con un valor medio de 0,00601 días⁻¹. Todos estos valores son claramente indicativos de que la velocidad de infiltración es muy lenta y que la decrecida es prolongada en el tiempo, probablemente debido al bajo grado de karstificación funcional, a la escasa jerarquización de los conductos kársticos y al importante espesor de la zona no saturada.

Del mismo modo, el coeficiente de heterogeneidad [$\varepsilon = (1/t) - 2\eta$, siendo t el tiempo para que el caudal drenado por la zona no saturada en la punta del hidrograma se reduzca a la mitad] varía entre 0,00710 (1998/99) y 0,02374 días⁻¹ (1996/97), lo cual permite conocer la escasa concavidad de la función $y = (1 - \eta t) / (1 + \varepsilon t)$ (Fig. 8), debido a que la disminución de caudal en la surgencia se produce de manera lenta y gradual durante la decrecida.

Los valores de los coeficientes η y ε permiten calcular el valor del parámetro i (valor de y para t=2 días) para cada una de las curvas analizadas, que en todos los casos ha dado valores superiores a 0,90. Según los criterios de Mangin (1975), estos datos indican que se trata de un sistema complejo y de grandes dimensiones. Sin embargo, el sistema abarca una extensión de 42 km² por lo que sus dimensiones no son especialmente grandes y la razón del valor tan

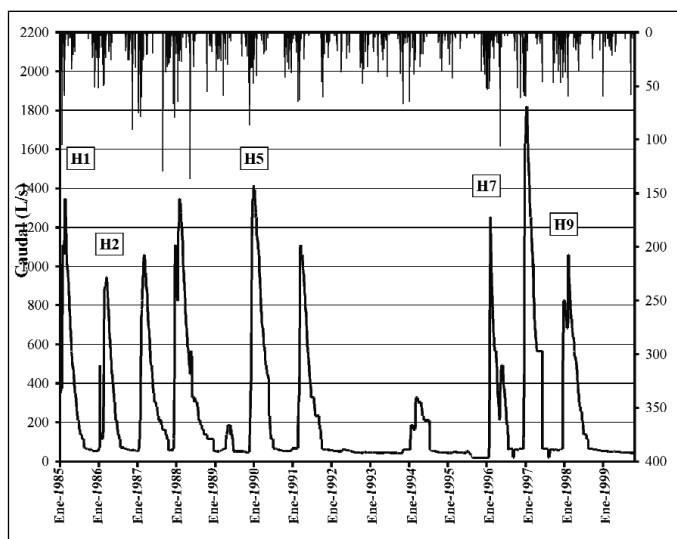


Fig. 7. Hidrogramas analizados de la serie diaria de datos del manantial de El Tempul

Fig. 7. Hydrographs analysed of the time serie made up by daily data recorded in El Tempul spring

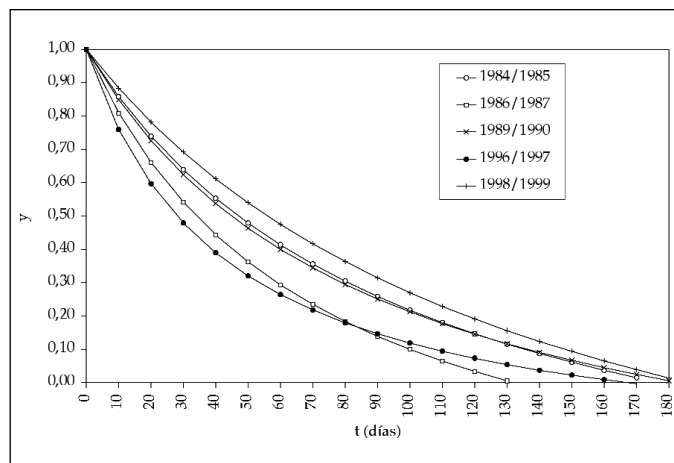


Fig. 8. Representación gráfica de la función "y" correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de El Tempul. Para cada hidrograma se han utilizado los valores correspondientes de h y e que se indican en la tabla 1

Fig. 8. Plot of "y" function for daily record hydrographs of El Tempul spring. Values for h and e (table 1) have been used for every hydrograph

MANATIAL DE EL TEMPUL	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (m ³)	k	D_d (días)	η (días ⁻¹)	ϵ (días ⁻¹)	i
Hidrograma 1 (84/85)	136	2,08E-03	4.141.995	0,52	177	0,00565	0,00998	0,97
Hidrograma 2 (86/87)	173	1,64E-03	4.524.488	0,56	132	0,00758	0,01426	0,96
Hidrograma 5 (89/90)	150	1,59E-03	4.798.948	0,60	183	0,00546	0,01136	0,97
Hidrograma 7 (96/97)	102	1,29E-03	5.407.971	0,68	167	0,00599	0,02374	0,94
Hidrograma 9 (98/99)	147	1,33E-03	5.246.605	0,65	186	0,00538	0,00710	0,98
Media	147	1,58E-03	4.824.001	0,60	169	0,00601	0,01329	0,96

Tabla 1. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión correspondientes a la serie diaria de datos del manantial de El Tempul. Ver explicación en el texto. Leyenda: D_a , duración del agotamiento; α , coeficiente de agotamiento; Vd, volumen dinámico; i y k, parámetros de Mangin (1970, 1975); D_d , duración de la decrecida; η , coeficiente de velocidad de infiltración y ϵ , coeficiente de heterogeneidad

Table 1. Obtained results by means of the recession curve analysis using daily records from El Tempul spring. See text for further details. Legend: D_a , depletion time; α , depletion coefficient; Vd, dynamic volume; i and k, Mangin parameters (1970, 1975); D_d , falling time; η , infiltration velocity coefficient and ϵ , heterogeneity coefficient

alto de i no debe ser otra que la duración prolongada de la decrecida, por la escasa jerarquización del drenaje kárstico en la zona no saturada.

A diferencia de la decrecida, la duración del agotamiento (D_a) es más desigual para cada una de las curvas estudiadas. Varía entre 102 (1996/97) y 174 días (1998/99). El coeficiente de agotamiento (α) calculado mediante la expresión de Maillet presenta valores entre $1,29 \times 10^{-3}$ días⁻¹ (1996/97) y $2,08 \times 10^{-3}$ días⁻¹ (1984/85), con un valor medio de $1,58 \times 10^{-3}$ días⁻¹. Estos valores indican que el agotamiento se produce de forma lenta, como corresponde a un sistema cuyo drenaje kárstico está poco organizado.

Los volúmenes dinámicos ($V_d = Q_0/\alpha$, siendo Q_0 el caudal al inicio del agotamiento caracterizado por el coeficiente α) calculados para los agotamientos estudiados varían entre 4,1 hm³ (1984/85) y 5,4 hm³ (1996/97); el valor medio es de 4,8 hm³. Al representar el porcentaje de volumen dinámico drenado para cada hidrograma en función del tiempo (Fig. 9) se observa que al cabo de un año sin alimentación (desde el comienzo de la decrecida), normalmente se drena menos del 50% de dicho volumen. Estos valores son indicativos del importante papel regulador del mismo. El volumen de tránsito o volumen drenado en un ciclo medio (V_t), calculado a partir de la serie de caudales diarios, alcanza un valor de 8 hm³. Así, los dos volúmenes anteriores permiten calcular el parámetro k (V_d/V_t), cuyos valores extremos para el período estudiado son 0,52 (1984/85) y 0,68 (1996/97), con un valor medio de k=0,60. Estos resultados traducen la importancia de la zona saturada y el gran poder regulador que presenta este sistema, de acuerdo con la metodología aplicada (Mangin, 1970; 1975).

Por otra parte, de la serie histórica de datos mensuales de caudal, se han seleccionado varios hidrogramas unitarios y se han tratado de forma análoga a como se ha descrito en el párrafo anterior. En la tabla 2 se recogen los hidrogramas y los resultados del análisis, que son similares a los obtenidos previamente a partir de los registros de datos diarios.

La decrecida sigue siendo muy lenta, por lo que el parámetro i también presenta valores superiores a 0,9. Del mismo modo, el agotamiento continúa siendo lento como lo prueban los bajos valores del coeficiente de agotamiento ($2,53 \times 10^{-3}$ días⁻¹ de media), lo

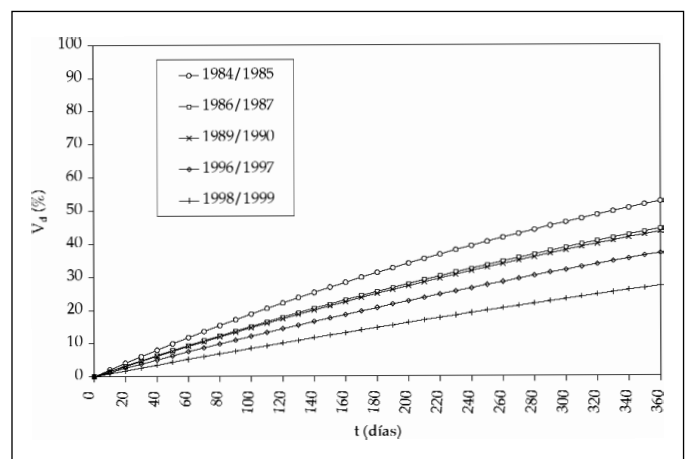


Fig. 9. Volumen dinámico (%) drenado en función del tiempo correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de El Tempul

Fig. 9. Dynamic volume (%) drained in time considering the daily record hydrographs of El Tempul spring

MANANTIAL DE EL TEMPUL	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (m ³)	k	D_a (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i
Hidrograma A (08/09)	90	2,05E-03	5.301.788	0,66	240	0,00417	0,01294	0,97
Hidrograma B (12/13)	150	1,76E-03	5.169.822	0,65	240	0,00417	0,03929	0,92
Hidrograma C (48/49)	390	1,82E-03	4.929.215	0,62	240	0,00417	0,03333	0,93
Hidrograma G (73/74)	240	1,92E-03	3.239.934	0,40	150	0,00667	0,02000	0,95
Hidrograma H (86/87)	150	1,66E-03	4.316.475	0,54	120	0,00833	0,00772	0,97
<i>Media</i>	<i>204</i>	<i>1,84E-03</i>	<i>4.591.447</i>	<i>0,57</i>	<i>198</i>	<i>0,00550</i>	<i>0,02266</i>	<i>0,95</i>

Tabla 2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión de la serie mensual de datos de caudal de el manantial de El Tempul. Ver explicación en el texto. Misma leyenda que la tabla 1

Table 2. Obtained results by means of the recession curves analysis using monthly records from El Tempul spring. See text for further details. Same legend than table 1

cual permite calcular el parámetro k, que también presenta valores de 0,57 de promedio, propios de acuíferos con baja karstificación funcional.

La coincidencia entre los resultados obtenidos a partir de datos diarios y mensuales, refuerza la validez de los resultados del presente estudio en el sentido de que el sistema presenta una escasa jerarquización del drenaje kárstico en su interior y, por consiguiente, tiene una gran capacidad para modular la señal de entrada.

Análisis de caudales clasificados

Los cambios de pendiente de la curva de caudales clasificados indican cambios en la velocidad de aumento o disminución de los caudales, que pueden ser debidos a diferentes orígenes (Mangin, 1971 y 1975). Un aumento de la pendiente representa un incremento del porcentaje de los caudales para un cierto número de clases, es decir, un crecimiento o disminución más lento de los caudales para esas clases: en situación de crecida representaría un fenómeno de tipo "trop-plein", mientras que en decrecida significaría el drenaje de una reserva preexistente. Por el contrario, una disminución de la pendiente, representa un crecimiento o disminución más rápida de los caudales para ciertas clases: en crecida podría deberse al aporte de otra cuenca vertiente y en decrecida podría atribuirse a la existencia de pérdidas de agua en una red de drenaje distinta de la que habitualmente drena el manantial o a la formación de una reserva que podría ser restituida al flujo en un ciclo posterior.

Este tipo de análisis requiere disponer de cierta información previa sobre el funcionamiento del acuí-

fero. De este modo, el análisis de caudales clasificados propuesto por Mangin (1971 y 1975), aún no siendo un método muy utilizado en investigación hidrogeológica, permite contrastar la información preexistente sobre el funcionamiento del acuífero.

La serie de datos diarios se ha dividido en clases de 50 L/s. Hubiera sido más razonable hacer clases de 25 L/s, pero no hay datos de caudal en la clase 75-100 L/s, por cuestiones imputables a la curva de gastos. Si se hicieran clases de 25 L/s podría haber alguna distorsión del gráfico de caudales clasificados, por lo que se ha descartado esta posibilidad. Posteriormente, se ha determinado el número de días que el manantial ha estado drenando caudales correspondientes a cada clase de 50 L/s y se ha calculado la frecuencia con que se produce cada clase. Finalmente, se ha obtenido la frecuencia acumulada y se ha representado en una escala de probabilidad de Mangin (1975), frente a las clases de caudales en escala logarítmica (Fig. 10). En el gráfico resultante se pueden distinguir tres tramos principales:

1. Tramo de caudales inferiores a 75 L/s, que corresponde a la situación de agotamiento del manantial. La pendiente es relativamente alta, porque las variaciones de caudal del agotamiento se producen de forma lenta, como se ha constatado a partir del análisis del hidrograma. Directamente sobre la figura, se aprecia que casi el 60 % de los datos de la serie corresponden a esta situación hidrodinámica.

2. Tramo de aguas altas, con caudales superiores a 900 L/s, correspondiente a la crecida del manantial. El hecho de que presente una mayor pendiente indica que las variaciones de caudal en el manantial de El Tempul durante la crecida se producen de forma lenta, porque en esas condiciones

($Q > 900$ L/s) es cuando entra en funcionamiento Fuente Imbro y posiblemente también el arroyo de Bogaz (Boca de Foz).

3. Tramo intermedio que corresponde a la situación de decrecida, con caudales comprendidos entre 75 y 900 L/s, dentro del cual es posible distinguir a su vez dos subtramos. Uno, con caudales entre 450 y 900 L/s, de mayor pendiente (disminución más lenta de los caudales) que correspondería al drenaje de la reserva de agua almacenada previamente entre la cota de Fuente Imbro y la de El Tempul. Otro, con caudales entre 75 y 450 L/s, menos pendiente (disminución rápida de los caudales), que traduce la formación de una reserva que podría ser restituida al flujo en un ciclo posterior.

Volúmenes de agua almacenados en el acuífero

Recursos hídricos

Para el período histórico 1862-1978, el caudal medio del manantial de El Tempul es de 283 L/s, equivalente a una descarga media cercana a 9 hm³/año. La precipitación anual media histórica en la estación de Gibraltar es de 825 mm y la superficie permeable del acuífero de Sierra de las Cabras es de 34 km², por lo que el volumen total de agua de lluvia que cae sobre dicha superficie es de 28 hm³/año como valor medio. Si las salidas controlables (9 hm³/año) constituyen la

única descarga del sistema, entonces la recarga media sería aproximadamente del 32 %. Así, para un período suficientemente largo y representativo, como es el caso, los recursos del sistema serían del orden de la tercera parte de las precipitaciones y equivaldrían a la descarga que se realiza por el manantial de El Tempul. En este balance elemental no se tienen en cuenta las entradas procedentes de la escorrentía que circula por los arroyos de Bogaz y Bujalance, pero tampoco se consideran las descargas producidas en aguas altas en Fuente Imbro y, eventualmente, Boca de Foz.

Durante el período 1985-1995, el caudal medio del manantial fue de 253 L/s (8 hm³/año), y la precipitación media en la estación de El Tempul fue de 850 L/m² (29 hm³/año). En este caso, aplicando los mismos supuestos que en el párrafo anterior, la recarga media es del orden del 28% de la precipitación.

Por tanto, una recarga media del orden de la tercera parte de la precipitación puede ser razonable, teniendo en cuenta el desarrollo de vegetación existente en la zona y la elevada pendiente topográfica de los afloramientos calizo-dolomíticos. Además, el dato anterior es coherente (si se admite la posibilidad de alguna escorrentía) con los resultados de los balances de Thornthwhite que se han efectuado, a nivel mensual, para diferentes capacidades de campo (25 y 50 mm).

Por otra parte, durante el período comprendido entre el 17-6-1996 y 17-11-1999, se dispone de datos de precipitación y de descarga por el manantial de El Tempul, así como de datos de profundidad del nivel piezométrico en un sondeo situado en el paraje de la Boca de Foz, que puede considerarse representativo del conjunto del acuífero. Para este período concreto, el balance del acuífero puede plantearse en los siguientes términos:

$$\begin{aligned} \text{Entradas} &= \text{Salidas} \pm \Delta V \text{ (variación de volumen)} \\ \text{Entradas} &= P (2670 \text{ l/m}^2) \cdot S (34 \times 10^6 \text{ m}^2) \cdot R (0,3) = \\ &= 27,2 \text{ hm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Salidas} = 29,7 \text{ hm}^3 \text{ (El Tempul)} + 1 \text{ hm}^3 \text{ (estimado a partir de Carreras, 1996)}$$

$$\text{DV} = S_t (42 \times 10^6 \text{ m}^2) \cdot d (-18,39 \text{ m}) \cdot m_e (0,005) = -3,9 \text{ hm}^3$$

$$\text{Así, Entradas (27,2 hm}^3) \cong \text{Salidas (30,7 hm}^3) - \Delta V (3,9 \text{ hm}^3) \cong 26,8 \text{ hm}^3,$$

siendo P la precipitación durante el período en cuestión sobre la superficie permeable (S), R la recarga media, S_t la superficie total del acuífero, d el descenso piezométrico medido y m_e la porosidad drenable.

Esta última tentativa de balance corrobora que la recarga media, es decir, los recursos renovables medios anuales del acuífero de Sierra de las Cabras, en las condiciones actuales, deben ser del orden de la

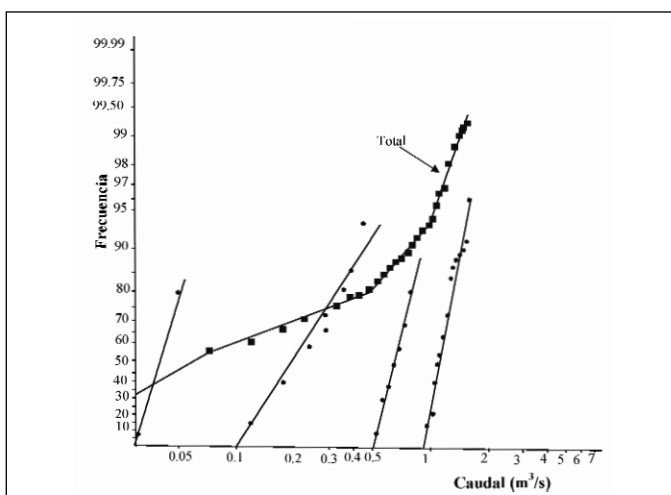


Fig. 10. Gráfico de caudales clasificados correspondientes a la serie diaria del manantial de El Tempul

Fig. 10. Sorted discharge graph of the daily record from El Tempul spring

tercera parte de la lluvia que cae sobre su superficie permeable. De la precipitación que cae sobre materiales de baja permeabilidad muy poca se debe infiltrar en el acuífero, puesto que cuando discurre únicamente lo hace sobre materiales permeables en dos tramos de corto recorrido (arroyos de Foz y Bujalance, en fig. 1), donde no existen formas exokársticas de absorción.

Parámetros hidráulicos y estimación de reservas

A partir del vaciado del acuífero en régimen de agotamiento es posible realizar estimaciones de la porosidad drenable, siempre que se conozca el volumen de agua drenado por el manantial y el volumen de acuífero vaciado. El volumen de agua drenado se determina mediante la expresión $(Q_i - Q_f) / \alpha$, donde Q_i y Q_f son, respectivamente, los caudales al inicio y al final del agotamiento y α el coeficiente de agotamiento. Por su parte, el volumen de acuífero vaciado se puede calcular si se conoce la extensión del acuífero (42 km² en este caso, aproximadamente) y el descenso del nivel piezométrico registrado durante el agotamiento.

Se han realizado los cálculos anteriores para los agotamientos de dos hidrogramas estudiados (7 y 9 en la tabla 1), correspondientes a los años hidrológicos 1996/97 y 1998/99, durante los cuales hay datos de piezometría en los sondeos de Boca de la Foz e Infierno (Tabla 3).

Los valores de porosidad drenable así calculados varían entre 0,33% y 0,7%, valores muy parecidos al 0,5% obtenidos por ITGE (1996), a partir de los datos del bombeo del año 1995. Se trata de valores bajos, aunque comparables a los que se obtienen en otros acuíferos cercanos, como la Sierra de Mijas, en acuíferos carbonatados formados por mármoles alpujárrides triásicos, muy fisurados pero poco karstificados (Andreo, 1997). En cualquier caso, estos datos de porosidad drenable son coherentes con los resultados del análisis correlatorio y espectral y del análisis del hidrograma.

A partir de los datos publicados por Carreras (1996), podría considerarse que el orden de magnitud

de la transmisividad del acuífero es 103 m²/día. Suponiendo un espesor saturado del orden de 100 m (coherente con los resultados de los sondeos), se obtiene una permeabilidad del orden de 10 m/día, propia de un medio poco jerarquizado, similar al de los acuíferos de la Sierra de Mijas (Andreo, 1997).

La estimación de reservas llevada a cabo por Carreras (1996) a partir de los datos de bombeo es de unos 0,2 hm³/m en los 29 m más superficiales, lo cual equivale a un volumen total de casi 6 hm³, siendo la porosidad drenable del 0,5%. Extrapolando estos valores, las reservas almacenadas hasta una profundidad del nivel piezométrico de 100 m, propia de una explotación razonable (tanto desde el punto de vista de la profundidad del nivel y del rendimiento de la explotación, como desde el punto de vista de la calidad del agua), son del orden de 20 hm³. Es claro que, de acuerdo con los datos de los sondeos, el espesor saturado de acuífero es superior a los 100 m, pero no es menos cierto que la porosidad drenable parece disminuir con la profundidad de acuerdo con los sondeos realizados, por lo que el volumen de reservas anterior, aunque aproximado, parece verosímil. Por supuesto, se trata de cálculos aproximados, con las limitaciones propias de los datos disponibles.

El cociente entre el volumen de reservas de agua (20 hm³) y los recursos medios anuales (10 hm³/año) permite estimar un tiempo medio de residencia del agua en el interior del acuífero de 2 años, aproximadamente. Este dato es coherente con los resultados del análisis correlatorio y espectral y los del análisis del hidrograma.

Conclusiones

La lluvia en el área de estudio es un fenómeno casi aleatorio. Así, la lluvia registrada en un día no se parece a la que se registra 1 ó 2 días antes o después. Además, el análisis correlatorio y espectral de los datos de lluvia en el área de estudio muestra que no existen tendencias interanuales (a largo plazo) en la distribución de las precipitaciones durante casi dos siglos de registro.

A pesar de la aleatoriedad de las precipitaciones,

Hidrograma	Volumen drenado (hm ³)	Variación de n. p. (m)	Volumen vaciado (hm ³)	Porosidad drenable
7	0,536816	3,83 (Foz)	160,86	0,0033
9	0,903969	2,80 (Infierno)	117,60	0,0077

Tabla 3. Cálculo de la porosidad drenable (n.p.=nivel piezométrico, en metros)
 Table 3. Calculation of drainable porosity (n.p.= piezometric level, in meters)

el sistema de la Sierra de las Cabras actúa como un gran filtro capaz de amortiguar y modular la señal de entrada. Se trata de un sistema con un efecto memoria considerable (del orden de 100 días); el tiempo de regulación es igualmente elevado (85 días), aspectos ambos indicativos de una importante capacidad reguladora ante las precipitaciones. En general, las variaciones más importantes de caudal tienen que ver con la componente anual de la distribución de las precipitaciones, es decir, todos los años hay un aumento de caudal asociado a las lluvias invernales, que son las que producen la recarga más importante. Estas lluvias encuentran una respuesta lineal y amplificada, aunque desfasada más de 2 meses.

Los resultados del análisis de hidrogramas unitarios del manantial de El Tempul, tanto para la serie de datos diarios de caudal como para la serie de datos mensuales, muestran que la decrecida del manantial tiene lugar lentamente (>100 días), lo cual significa que la infiltración no se produce de forma rápida o concentrada, porque existe una zona de infiltración potente y poco karstificada. El agotamiento del manantial comienza con un caudal de 75 L/s y está caracterizado por un coeficiente (α) del orden de 2×10^{-3} días $^{-1}$, indicativo de que el agotamiento se realiza de forma lenta. Así, al inicio del agotamiento suele haber 5 hm 3 susceptibles de ser drenados por el manantial, por lo que al cabo de un año sin llover se habría drenado, como mucho, la mitad del mismo. Estos datos son de particular interés en la gestión de los recursos hídricos del acuífero de Sierra de las Cabras.

El análisis de caudales clasificados de la serie de datos diarios del manantial de El Tempul permite concluir que por encima de 900 L/s el manantial está en crecida, y previsiblemente emergerá agua subterránea Fuente Imbro e incluso en Boca de Foz, por lo que la variación de los caudales de El Tempul se producirá de forma más lenta de lo que cabría esperar. Entre 900 y 75 L/s el manantial se encuentra en decrecida drenando la reserva almacenada anteriormente entre 140 y 120 m s.n.m. Y, por debajo de 75 L/s el manantial está en agotamiento, por lo que el vaciado se realiza de acuerdo con el coeficiente de agotamiento.

Los recursos medios renovables del sistema, en las circunstancias actuales, son de 8-9 hm 3 /año; la cantidad de agua que se infiltra es aproximadamente la tercera parte de la precipitación. El estudio de los dos hidrogramas unitarios más recientes del manantial, durante los cuales se conocen las variaciones piezométricas producidas en el acuífero, ha permitido estimar una porosidad eficaz media del 0'5%, una permeabilidad media del orden de 10 m/día y unas reservas aproximadas de 20 hm 3 . El tiempo medio de

permanencia del agua dentro del sistema es superior a 2 años.

Agradecimientos

El presente trabajo se enmarca en el Convenio de Colaboración existente entre la Dirección de Obras Hidráulicas de la Junta de Andalucía y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y para su ejecución ha contado con la colaboración del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Se agradece al Real Observatorio de San Fernando (Cádiz) la cesión de los datos de lluvia de la estación de San Fernando, y a la Confederación Hidrográfica del Sur de España y a la Oficina Meteorológica de Gibraltar los datos de precipitación de la estación de Gibraltar. A la Empresa de Aguas de Jerez (AJEMSA), se agradece su apoyo durante las visitas de campo y la cesión de los datos de caudal del manantial de El Tempul. Este trabajo es una contribución al Proyecto PB 98-1397 de la DGES y al Grupo de Investigación RNM 308 de la Junta de Andalucía. Los autores agradecen las sugerencias y comentarios del Dr. A. Pulido (Universidad de Almería) y del Dr. E. Custodio (IGME), que han contribuido a mejorar el manuscrito original.

Referencias

- Andreo, B. 1997. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga, Málaga, 489 pp.
- 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.
- Andreo, B., Carrasco, F., Mangin, A., Antigüedad, I. y Vadillo, I. 1996. El análisis correlatorio y espectral aplicado al sistema carbonatado alpujarride de Torremolinos (Sierra de Mijas, Málaga). *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 233-247.
- 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 pp. 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*, Segovia, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, 3, 541-553.

- Benavente, J., Pulido-Bosch, A. y Mangin, A. 1985. Application of correlation and spectral procedures to the study of discharge in a karstic system (Eastern Spain). *Karst Water Resources Symposium*, Ankara, IAH Publ. 161, 67-75.
- Cardoso da Silva, G. 1997. *Comportamiento de los manantiales del karst nororiental de la Serra de la Tramuntana, Mallorca*. Tesis Doct. Univ. Politécnica de Cataluña, 376 pp.
- Carreras, A. 1996. Investigación y explotación del acuífero de la Sierra de las Cabras (S. José del Valle, Cádiz). *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 9-21.
- Custodio, E. y Llamas, R. 1976. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, Barcelona, 2359 pp.
- 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.
- 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). *Geolis*, 1, 50-61.
- Chauve, P. 1960-62. Structure Géologique de la Région Centrale de la Province de Cadix (Espagne). *Memories hors de série de la Societe Geologique de France*, 1, 257-264.
- Eiselohr, L. 1995. *Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques*. Tesis Doct. Univ. Neuchâtel, 121 pp.
- García-Latorre, F., Cruz-Sanjulián, J. e Ibarra, V. 1987. Precisiones sobre el funcionamiento del sistema kárstico del barranco de Peñalba a partir de los caudales clasificados del manantial de Iturriotz (Bizkaia) en los ciclos 1983-84 y 1984-1985. *Boletín Geológico y Minero*, 98(1), 58-68.
- Ibarra, V., Cruz-Sanjulián, J.J. y García-Latorre, F. 1987. Análisis correlatorio y espectral del manantial de Iturriotz (Vizcaya): El sistema del Barranco de Peñalba como ejemplo de un tipo de karst de características mixtas. *Estudios Geológicos*, 43, 241-248.
- ITGE 1990. *Mapa geológico y memoria explicativa de la hoja n°1063 (Algar)*. Mapa Geológico Nacional, a escala 1:50.000, Plan Magna. Madrid.
- ITGE 1996. *Funcionamiento hidrodinámico y regulación hidrogeológica del manantial de El Tempul (Cuenca del Guadalquivir, Cádiz)*. Informe inédito. Madrid.
- Jenkins, G.M. y Watts, D.G. 1968. *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco, 525 pp.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. y Banton, O. 1998. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205, 217-231.
- López-Chicano, M. 1992. *Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga)*. Tesis Doct. Univ. Granada, 387 pp.
- 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. 1971. Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Annales de Spéléologie*, 26 (2), 283-329.
- Mangin, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct. Sci. Nat. Univ. Dijon. En: *Annales de Spéléologie*, 29 (3), 283-332; 29 (4), 495-601; 30(1), 21-124.
- Mangin, A. 1981a. Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 293, 401-404.
- Mangin, A. 1981b. Apports des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 293, 1011-1014.
- 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. 1994. Karst hydrogeology. En: Gibert, J., Danielpol, D.L. y Standford J.A. (eds), *Groundwater Ecology*, Academic Press, San Diego, 43-67.
- Mangin, A. y Pulido-Bosch, 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 pp.
- Morales, T. 1991. *Estudio hidrogeológico de la Zona Norte de Vizcaya*. Tesis Doct. Univ. País Vasco, 503 pp.
- Obartí F.J., Garay, P. y Morrell, I. 1988. An attempt to karst classification in Spain based on system analysis. XXI *Congreso Internacional de la AIH*, Guilin, China, 328-336.
- Padilla, A. 1990. *Modelos matemáticos aplicados al estudio de acuíferos kársticos*. Tesis Doct. Univ. Granada, 267 pp.
- Padilla, A. y Pulido-Bosch, 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. 1987. Aproximaciones metodológicas al estudio del funcionamiento hidrogeológico del karst. *Geolis*, 1, 18-23.
- Ramonedá, J., Freixes, A., Monterde, M., Morin, J.P. y Gourcy, L. 1999. Los acuíferos kársticos del Parque Natural del Cadí-Moixeró (Pirineo oriental, Catalunya). En: Andreo, B., Carrasco, F. y Durán, J.J. (eds.), *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*, 483-495.
- Sahuquillo, A., Estrela, T. y Andreu, J. 1987. Análisis de hidrogramas de manantiales kársticos. *IV Simposio de Hidrogeología*, 317-330.

Recibido: Marzo 2001
Aceptado: Junio 2001