

## ANÁLISIS CORRELATORIO Y ESPECTRAL DE LOS CAUDALES DEL MANANTIAL DE ITURRIOTZ (VIZCAYA): EL SISTEMA DEL BARRANCO DE PEÑALBA COMO EJEMPLO DE UN TIPO DE KARST DE CARACTERÍSTICAS MIXTAS

V. Ibarra-Lozano (\*), J. Cruz-Sanjulián (\*) y F. García-Latorre (\*)

### RESUMEN

Con objeto de definir la estructura de las series cronológicas de lluvias y caudales, así como para mejorar el conocimiento del sistema kárstico del barranco de Peñalba, se ha aplicado el análisis de correlación y espectral a los datos del manantial de Iturriotz y del pluviómetro del Juncal, del período 6 de Agosto de 1983 a 12 de Octubre de 1985. Dicho análisis revela un efecto memoria relativamente importante y un tiempo de regulación de 23,5 días; sin embargo, se pone de manifiesto un efecto de filtro muy reducido, con una banda espectral de 0.30-0.32; el correlograma cruzado evidencia un desfase muy corto entre las señales de entrada y salida, a pesar de que existe un cierto poder regulador al final de la respuesta impulsional. Estos resultados no corresponden exactamente a ninguno de los modelos-tipo definidos por Mangin (1982), sino que sugieren un sistema de características mixtas. Los rasgos aparentemente contradictorios que se deducen de este análisis pueden ser atribuidos a la heterogeneidad del material acuífero y a la complejidad de los mecanismos de recarga.

**Palabras clave:** *Análisis correlatorio, análisis espectral, acuífero kárstico, Vizcaya.*

### ABSTRACT

In order to define the structure of the time series of rainfall and discharge, and also to improve the knowledge of the Barranco Peñalba karstic system, a correlation and spectral analysis has been made of the Iturriotz spring and the Juncal pluviometer data (period: 6<sup>th</sup> August 1983 to 12<sup>th</sup> October 1985). Such analysis reveals a relatively important memory effect and a regulation time of 23,5 days. However, it has been made clear a very small modulation effect with a spectral band of 0.30-0.32. The cross correlation reveals a lag very small between the input and output signals, in spite of the existence of a some regulation power at the end of the impulsional answer. These results do not match exactly any of the type-model defined by Mangin (1982), but suggests a system with mixed characteristics. The apparently contradictory features inferred from this analysis can be attributed to the heterogeneity of the aquifer materials and to the complexity of the recharge mechanisms.

**Key words:** *Correlation analysis, spectral analysis, karstic aquifer, Biscay.*

### Introducción

El análisis correlatorio (en el dominio temporal) y espectral (en el dominio frecuencial) de las crónicas de lluvias y caudales aporta una interesante información acerca del comportamiento del sistema kárstico; en efecto, la estructura que este análisis pone de manifiesto en las mencionadas series cronológicas, al relacionarlas entre sí (aná-

lisis cruzado) o tratadas separadamente (análisis simple), revela el papel modulador del sistema sobre la señal de entrada, es decir, la respuesta modificada por el sistema en los caudales de las surgencias ante el estímulo representado por la precipitación.

Naturalmente, el tipo de modulación evidenciado por el análisis correlatorio y espectral dependerá de las características funcionales del sis-

(\*) Departamento de Geotectónica. Facultad de Ciencias (Lejona). Universidad del País Vasco. Apartado 644. 48080 Bilbao.

tema, que, por consiguiente, pueden deducirse a partir de aquél, aspecto en el que radica su interés.

De acuerdo con Mangin (1982), los sistemas kársticos mal drenados atenúan todas las variaciones observadas a corto plazo en la lluvia en provecho de fuertes variaciones estacionales. Se trata de sistemas con "memoria", con reservas importantes y, por tanto, que muestran una gran inercia, de modo que "filtran" intensamente la información lluvia. Todo ello se traduce en que el sistema posee un efecto regulador estacional, anual y plurianual. En consecuencia, el correlograma de caudal es débilmente decreciente; en el dominio frecuencial las variaciones a corto plazo (altas frecuencias) son filtradas y las que se producen a largo plazo (bajas frecuencias) son amplificadas; en fin, la duración de la influencia de un estímulo de precipitación, lo que se denomina tiempo de regulación, es muy grande.

Por el contrario, y siempre según el mismo autor (Mangin, op. cit.), los sistemas con un drenaje muy organizado no poseen reservas notables y la respuesta de los manantiales reproduce con pocas modificaciones la señal de entrada proporcionada por la lluvia, que, de este modo, apenas es "filtrada". Se trata de sistemas con poca memoria y de escasa inercia, es decir, en los que las lluvias dan lugar a crecidas acusadas sin que exista un almacenamiento. En este caso se obtienen correlogramas que decrecen rápidamente, con tiempos de regulación muy cortos y en los que la banda espectral es muy ancha.

Tales diferencias se observan igualmente en el correlograma cruzado, en el que se analiza la relación causa-efecto entre lluvia y caudal. Mientras que la lluvia representa en nuestro dominio climático una función prácticamente aleatoria pura, el correlograma cruzado constituye la respuesta impulsional del sistema, es decir, un concepto equivalente al del hidrograma unitario del acuífero.

Evidentemente, este análisis constituye una poderosa herramienta para precisar el comportamiento de un sistema y, al tiempo, para comparar entre sí sistemas diferentes. En este sentido, Mangin (1982) ha propuesto una clasificación de los acuíferos kársticos en cuatro tipos (Fig. 1). Como se aprecia en dicha figura, el "tipo Aliou" corresponde a los acuíferos no inerciales bien drenados y el "tipo Torcal" al comportamiento opuesto (acuíferos inerciales poco drenados), de acuerdo con la descripción expuesta anteriormente. Entre estos dos extremos se sitúan los tipos "Baget" y "Fontestorbes".

Naturalmente, en estas diferencias están tam-

bién involucrados aspectos prácticos referentes a la posibilidad de explotación de los distintos sistemas y sobre todo a la desigual posibilidad de regulación de los recursos.

Todas estas razones nos han movido a aplicar sistemáticamente este método de análisis a todos los sistemas estudiados en este Departamento, en el marco del "Estudio Hidrogeológico de Vizcaya", en el que se ha dotado de estaciones de aforo de diverso tipo, controladas en continuo con limnógrafo, a numerosas surgencias kársticas.

Para ello se ha desarrollado en este Departamento un programa (Ramon-Lluch y Cruz-Sanjulián, 1986) que presenta al menos dos innovaciones de interés. La primera es que los resultados no sólo se obtienen tabulados sino que además se realizan automáticamente en plotter las correspondientes representaciones gráficas, de las que las figuras que acompañan este artículo, obtenidas directamente del tratamiento, son un ejemplo. La segunda innovación que merece ser citada es la relativa a la entrada de datos; es sabido que en esta técnica es necesario introducir los datos de series cronológicas extensas de precipitación y caudales, con un considerable consumo de tiempo y con el consiguiente riesgo de comisión de errores. En nuestro programa, la entrada de datos se realiza también de modo automático, aprovechando que tanto los datos de precipitación como de caudal están almacenados en disco, los últimos obtenidos a su vez automáticamente a partir del tratamiento de limnigramas, introducidos con un digitalizador (Cruz-Sanjulián, 1984).

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación del análisis correlatorio y espectral al sistema del Barranco de Peñalba, drenado por el manantial de Iturriotz, en la parte occidental de Vizcaya.

Tipos	Efecto Memoria	Banda Espectral	Tiempos de regulación	Hidrograma unitario
ALIOU	Reducido (5 días)	Muy ancha (0.30)	10-15 días	
BAGET	Pequeño (10-15 días)	Ancha (0.20)	20-30 días	
FONTES-TORBES	Grande (50-60 días)	Estrecha (0,10)	50 días	
TORCAL	Considerable (70 días)	Muy estrecha (0.05)	70 días	

Fig. 1.—Modelos-tipo de acuíferos kársticos distinguidos por Mangin (1984) a partir del análisis correlatorio y espectral.

### El sistema del Barranco de Peñalba

El sistema acuífero del barranco de Peñalba, localizado en el sector de Trucíos (Vizcaya), está constituido por materiales calcáreo-detriticos, denominados por RAT (1959) "paraurgonianos" (Fig. 2). El encajamiento de dicho barranco permite reconocer de abajo a arriba la siguiente secuencia: calizas micríticas oscuras (80 m.), calcarenitas (35 m.), calizas arenosas (10-70 m.) y areniscas (200 m.).

En esta secuencia coexisten dos niveles de distinto grado de karstificación: el inferior, menos karstificado, representado por las calizas micríticas, y el superior, con una karstificación más intensa, desarrollada en las calcarenitas y calizas arenosas; además, se observan formas de absorción en las areniscas suprayacentes.

Existe una recarga adicional del sistema acuífero a partir de las aguas superficiales del arroyo de Peñalba, hasta el punto de que se infiltra en su totalidad en estiaje, a través de sumideros existentes en su cauce.

El drenaje subterráneo del sistema se realiza a través del manantial de Iturriotz, con una considerable variabilidad de los caudales. El caudal medio es de 80-90 l/seg., según el año hidrológico considerado. Esta surgencia está controlada por un vertedero de lámina delgada rectangular, dotado de limnógrafo, instalado por este Departamento en Junio de 1983. Desde entonces se dispone, por tanto, de un control continuo de datos de caudal.

El tratamiento de estos datos ha puesto de manifiesto un funcionamiento complejo del sistema, descrito por los autores en trabajos previos (Cruz-Sanjulián et al., 1986; García-Latorre et al., 1987).

El análisis de las curvas de decrecida (Cruz-Sanjulián et al., 1986) evidencia un sistema con una decrecida muy rápida y, sin embargo, con cierto poder regulador. Dicha aparente contradicción fue interpretada como el resultado de la influencia simultánea de dos factores. El primero estriba en la ya mencionada coexistencia de dos niveles de distinto grado de karstificación, de modo que en crecida la descarga estaría controlada fundamentalmente por el nivel superior, más karstificado, mientras en estiaje Iturriotz sería alimentado por el nivel menos karstificado. Por otra parte, la recarga representada por el Arroyo de Peñalba implica una influencia indirecta del régimen de descarga de pequeños manantiales situados en la cabecera de la cuenca, que drenan materiales detríticos del Urganiano basal y del Complejo Wealdense; esta recarga ha sido estimada mediante una serie de aforos diferenciales, realizados en distintos regímenes, con un valor próximo a 33 l/seg., lo que parece sugerir una limitada capacidad de infiltración en los sumideros. Por otra parte, el arroyo debe recibir en crecida aportaciones de trop-plein o, por lo menos, de recarga rechazada.

Este funcionamiento del acuífero ha sido corroborado por el método de los caudales clasificados (García-Latorre et al., 1987). En efecto, en el manantial de Iturriotz se ha puesto de manifiesto una relación lineal entre la ley de probabilidad y el logaritmo de los caudales, lo que es típico de sistemas que muestran una gran variabilidad de estos últimos. En dicha representación se han identificado dos rupturas de pendiente a 40-50 l/seg. y 400 l/seg., que se pueden atribuir, respectivamente, a la existencia de recarga rechazada en el cauce del arroyo de Peñalba y como el efecto conjunto de: a) inversión en el funciona-

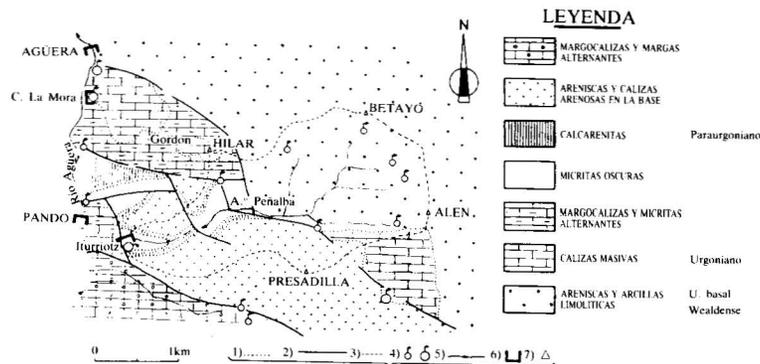


Fig. 2.—Mapa geológico del sector del barranco de Peñalba. 1: Contacto estratigráfico; 2: Contacto mecánico; 3: Divisoria de aguas superficiales; 4: Manantiales; 5: Red hidrográfica; 6: Estación de aforo; 7: Vértice geodésico.

miento de los sumideros existentes en el cauce, b) aparición de trop-pleins que vierten al mismo y, eventualmente, c) la limitación en la capacidad de infiltración de una parte de la superficie de recarga del acuífero, particularmente representada por las areniscas del complejo paraurgoniano que yacen sobre los términos carbonatados.

Es digno de subrayar el hecho de que los resultados del análisis de correlación y espectral, que se presentan en este trabajo, son perfectamente coherentes con las conclusiones obtenidas mediante la aplicación de otros métodos de investigación, expuestas en los trabajos anteriormente citados. Todos los resultados coinciden en señalar la relativa complejidad funcional del sistema acuífero del barranco de Peñalba.

#### Análisis de correlación y espectral del sistema del barranco de Peñalba

Dada la extensión de la crónica de datos disponible, sólo es factible realizar un análisis de ciclo corto (Mangin, 1984). Para ello se ha elegido el período comprendido entre el 6 de Agosto de 1983 y el 12 de Octubre de 1985, con una dura-

ción de 799 días; es necesario señalar que este período incluye dos ciclos hidrológicos, que han sido también estudiados por otros métodos (García-Latorre et al., 1987); los resultados obtenidos del análisis correlatorio y espectral de cada uno de dichos ciclos por separado coinciden sensiblemente con los que resultan de considerar el total del período; en todos los casos se ha utilizado una ventana de observación de 125 días, con paso diario.

La función de salida está representada por los caudales medios diarios del manantial de Iturriotz y para la señal de entrada se han utilizado las precipitaciones diarias medidas en el pluviómetro de la estación del Juncal, situada 7 km. al NW del manantial. Los valores medios de ambas variables en el período estudiado son respectivamente, 80 l/seg. y 3.1 mm/día.

#### Análisis de la función de entrada

El correlograma simple de precipitaciones evidencia el carácter de función casi aleatoria pura de esta variable, que, como se observa en la Fig. 3, sólo muestra una ligera correlación para días consecutivos.

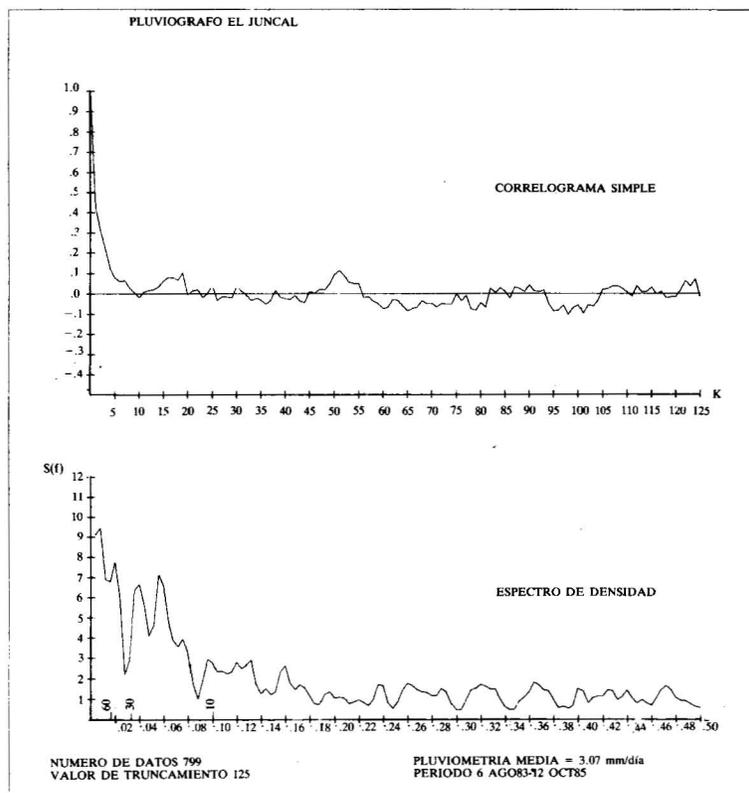


Fig. 3.—Correlograma simple y espectro de densidad de varianza de precipitaciones de la estación de El Juncal.

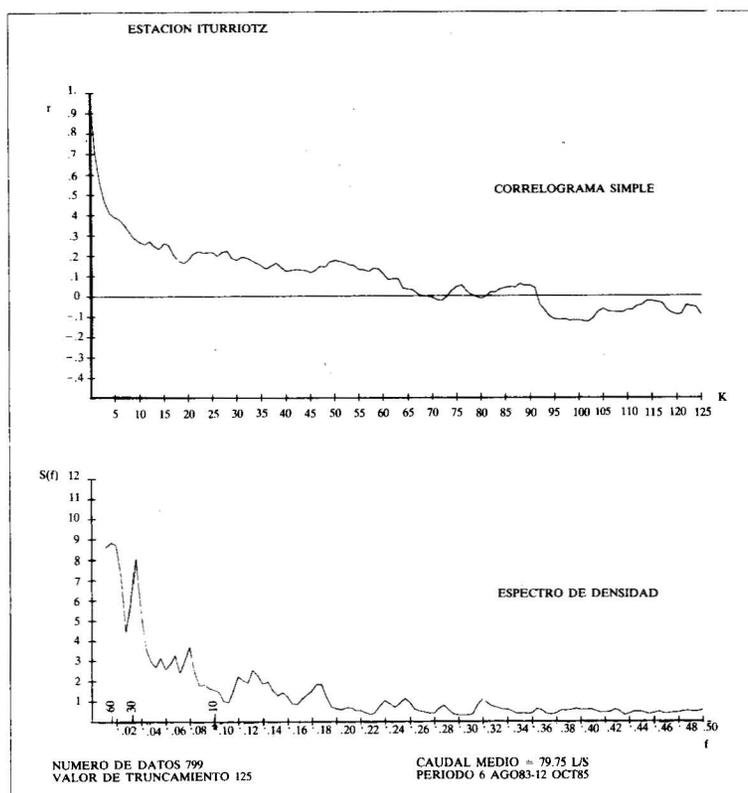


Fig. 4.—Correlograma simple y espectro de densidad de varianza de caudales de la estación de aforo del manantial de Iturriotz.

El espectro de densidad de varianza de la función precipitación (Fig. 3) pone de manifiesto una periodicidad pluviométrica para ciclos de 50 y, sobre todo, 25, 18, e incluso 13 días. Esta misma periodicidad se observa en los correlogramas de otras estaciones pluviométricas de la región y de los pluviógrafos instalados en el marco de nuestro estudio (trabajos en preparación).

#### *Análisis de la función de salida*

El correlograma correspondiente a los caudales de Iturriotz presenta unas características muy peculiares (Fig. 4). Se observa, en primer lugar, un descenso bastante rápido del correlograma hasta valores de aproximadamente  $r = 0.4-0.3$ . A partir de aquí se atenúa considerablemente ese descenso, de modo que el valor de  $r = 0.2$  se alcanza a los 18 días y son necesarios 60 días para llegar a un valor de  $r = 0.1$ . Ello traduce un efecto memoria relativamente importante. Sin embargo, este resultado no puede ser interpretado de forma simple, en el sentido de que el sistema dispo-

ne de unas reservas considerables; de hecho, todas las conclusiones obtenidas de la aplicación de otros métodos de trabajo sugieren que el carácter evidenciado en el correlograma debe ser una consecuencia del importante papel ejercido por la recarga durante el estiaje de aguas superficiales del arroyo de Peñalba.

En el dominio frecuencial se observa un filtrado de la información lluvia a partir de aproximadamente 3 días (la anchura de la banda espectral es del orden de 0.30-0.32). En el campo de las frecuencias menores se detectan claramente las mismas tendencias observadas en las precipitaciones para 50 y, sobre todo, 18 y 13 días.

El tiempo de regulación deducido a partir del espectro de frecuencia es de 23,5 días. Es forzoso señalar aquí que esta aparentemente larga duración de la influencia de la señal de entrada en la respuesta del manantial de Iturriotz debe ser también atribuida en parte al efecto moderadamente más regulador representado por la recarga a partir de aguas procedentes de manantiales que surgen en materiales detríticos.

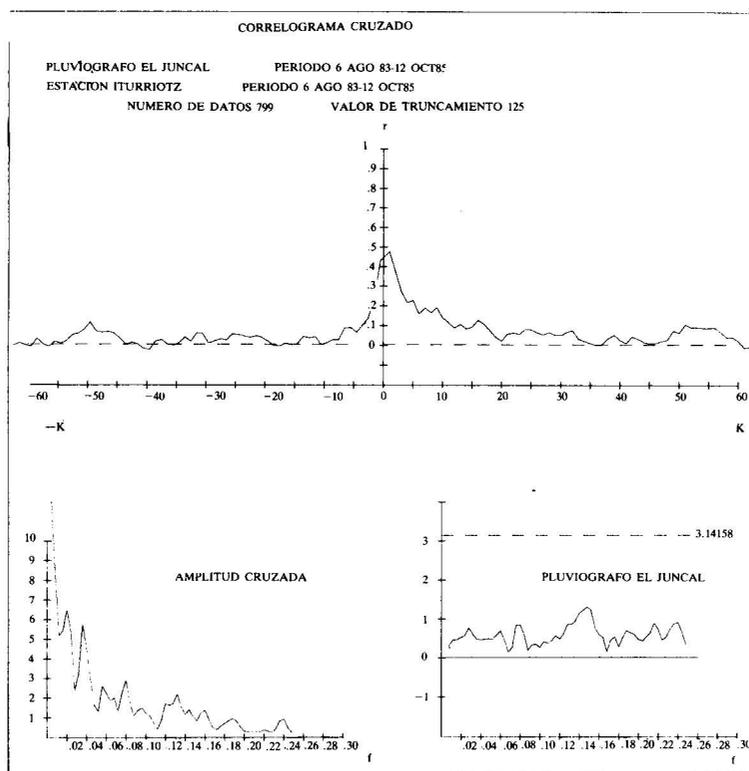


Fig. 5.—Correlograma cruzado, amplitud cruzada y función de fase de la precipitación en la estación de El Juncal y de los caudales del manantial de Iturriotz.

### Análisis cruzado

En primer lugar, se advierte que no existen errores de importancia en los datos de partida, dado que el correlograma cruzado tiende a cero rápidamente para los valores negativos de  $k$  (Fig. 5).

En cuanto a la respuesta impulsional del sistema, está caracterizada por un valor máximo del coeficiente de correlación próximo a 0.5 para  $k=1$  y que, al menos los primeros días, define un pico relativamente agudo. Ello es buena prueba de la rápida respuesta del manantial de Iturriotz a la precipitación, máxime si se tiene en cuenta que mientras los caudales medios diarios han sido calculados por integración numérica a partir del hidrograma (lo que implica asignar a un día concreto el volumen emitido entre las 0 y 24 horas de dicho día), las medidas pluviométricas utilizadas se realizan a las 8 de la mañana, lo que supone asignar a un día determinado una parte de lluvia precipitada realmente al día siguiente. De hecho, la comparación de los limnigramas de Iturriotz y los pluviogramas de Pico Ubieta (11 km. al SE del manantial) revela un tiempo de respuesta inferior a cuatro horas.

Esta rápida respuesta sería atribuible principalmente a la considerable karstificación de las calcaenitas, que constituyen, como ya se ha comentado, el nivel superior del sistema, con una mayor influencia en la respuesta de éste precisamente en los momentos de crecida. De este modo, se revelaría una muy escasa inercia del sistema y, consecuentemente, un escaso poder regulador.

No obstante, a partir de  $k=5$  días la disminución del coeficiente de correlación se amortigua visiblemente, lo que indicaría un cierto poder regulador del sistema al final de la respuesta impulsional. Este hecho ya ha sido interpretado en anteriores páginas y en otros trabajos (Ver Cruz-Sanjulián et al., 1986) como el efecto del papel predominante que durante el estiaje presenta el nivel inferior del acuífero, menos karstificado, y de las distintas modalidades de la recarga, entre las que hay que contar con el poder regulador de las areniscas que representan el techo de la secuencia paraurgoniana.

La función de amplitud cruzada representa la covarianza entre precipitaciones y caudales en el dominio frecuencial, es decir, la respuesta impulsional en dicho dominio. Se advierten en el caso de Iturriotz (Fig. 5) componentes idénticos a los

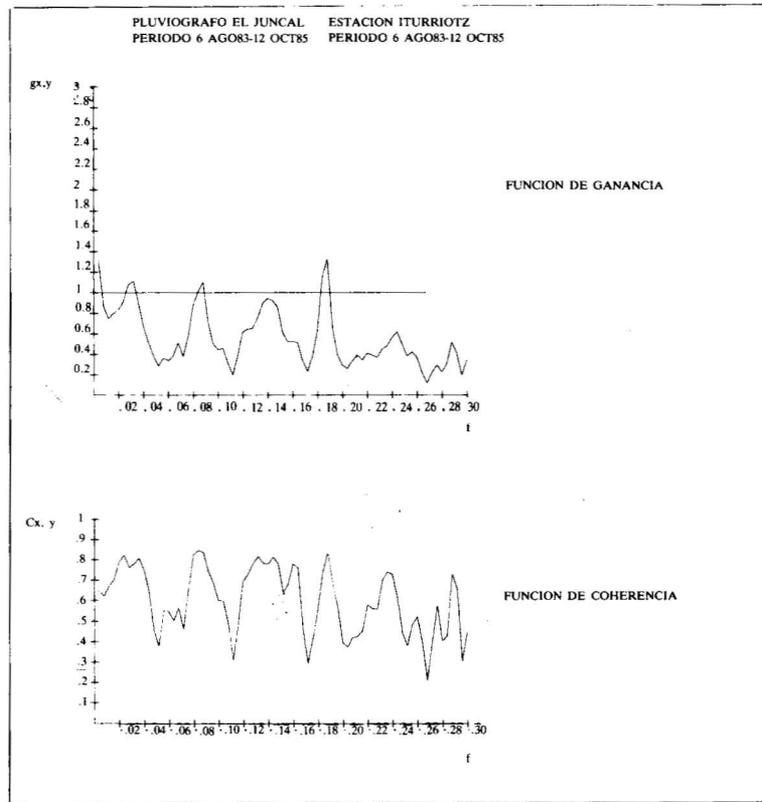


Fig. 6.—Funciones de ganancia y coherencia del análisis cruzado de precipitaciones y caudales (estaciones de El Juncal e Iturriotz, respectivamente).

de la señal de entrada (Fig. 3), en particular los correspondientes a las frecuencias 0.02, 0.04, 0.06 y 0.08, que coinciden sensiblemente con las periodicidades puestas de manifiesto para 50, 25, 18 y 13 días. Ello significa, en suma, que la información lluvia es muy pobremente filtrada, de modo que los caudales traducen de forma muy acusada la información correspondiente a la función de entrada.

En cuanto a la función de fase, cuantifica el desfase entre el impulso de entrada, representado por la precipitación, y la respuesta en el caudal del manantial. El desfase calculado en este caso es de 1.8 días para una frecuencia de 0.04 (sucesos de periodicidad aproximadamente mensual) y de 1.7 días para una frecuencia de 0.08 (sucesos de periodicidad próxima a la quincenal).

La función de ganancia representa la modificación introducida por el sistema en la señal de entrada, ya sea en el sentido de amplificarla o de atenuarla. La Fig. 6 pone de manifiesto que el sistema del barranco de Peñalba sólo produce una ligera amplificación en el dominio de las muy bajas frecuencias y tampoco parece producir atenuación salvo quizá muy débilmente para las ma-

yores frecuencias. De ello parece deducirse una vez más la escasa influencia del papel regulador de las reservas.

La función de coherencia expresa la linealidad del sistema, es decir, el grado de correlación existente entre lluvias y caudales en el dominio frecuencial. En el caso del manantial de Iturriotz, como era de esperar a la vista de todos los datos ya expuestos, se observa una coherencia aceptable para las bajas frecuencias y que disminuye, pero muy lentamente, para las altas frecuencias. Ello significa que no existen diferencias apreciables en la respuesta del manantial ante las señales de entrada de diferente frecuencia.

### Conclusiones

El análisis correlatorio y espectral de los datos del manantial de Iturriotz evidencia un efecto memoria relativamente importante (20-40 días), y un tiempo de regulación de 23.5 días. Sin embargo, en aparente contradicción con estas características que parecerían reflejar un sistema con una considerable inercia, el análisis cruzado pone

de manifiesto una rápida respuesta del sistema y un escaso poder regulador, por lo menos al principio de la respuesta impulsional. La modulación de la señal de entrada es, en todos los casos, muy débil, de modo que el espectro de densidad de varianza de los caudales muestra prácticamente las mismas características que la señal de entrada.

De este modo, el sistema de Iturriotz presenta algunos rasgos intermedios entre los tipos Baget y Fontestorbes (Fig. 1), definidos por Mangin (1982); sin embargo, la anchura de la banda espectral (0.30-0.32) corresponde más bien al tipo Aliou (sistemas no inerciales, muy karstificados) y el correlograma cruzado (hidrograma unitario) parece situarse entre el propio de los tipos Aliou y Baget.

Todo ello evidencia un sistema complejo, con características mixtas, como consecuencia de su peculiar funcionamiento. En efecto, el sistema del barranco de Peñalba podría ser calificado de sistema binario en el sentido de Mangin (1982), en la medida que integra el drenaje de la precipitación caída sobre el propio sistema kárstico (localmente condicionada por infiltración a través de materiales detríticos suprayacentes al karst) y la recarga producida por aguas superficiales a través de sumideros; en atención a que estas últimas incluyen no sólo la escorrentía superficial sino también las aportaciones de pequeños manantiales en materiales detríticos, el sistema podría incluso ser calificado de "terciario".

A la complejidad que implica este múltiple mecanismo de recarga hay que añadir la debida a la heterogeneidad del propio acuífero, en el que se ha identificado un nivel inferior menos karstificado, que ejerce el principal control de la respuesta en estiaje, y un nivel superior más karstificado, que parece ser el responsable de la peculiar respuesta de las crecidas. La intensa karstificación

de este último nivel está representada por diversas formas kársticas de gran tamaño que parecen ser en la actualidad simplemente funcionales y, en suma, el resultado de una evolución paleokárstica anterior.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Estudio Hidrogeológico de Vizcaya, encomendado a este Departamento por la Excm. Diputación Foral del Señorío, a través de la Fundación Euskoiker. Los autores agradecemos a dichas Instituciones su colaboración y su autorización para publicar los presentes datos. Asimismo agradecen a Iberduero, S.A., su amabilidad al facilitar los datos pluviométricos de la estación de El Juncal.

#### Referencias

- Cruz-Sanjulián, J. (1984): "Tratamiento automático de limnigramas en microcomputador". *Bol. Geol. Min.*, 95, 456-462.
- Cruz-Sanjulián, J.; García-Latorre, F. e Ibarra-Lozano, V. (1986): "Delimitación del sistema kárstico del manantial de Iturriotz (Trucíos, Vizcaya): su caracterización a partir del análisis del hidrograma". *Bol. Geol. Min.*, 96, 782-792.
- García-Latorre, F.; Cruz-Sanjulián, J. e Ibarra-Lozano, V. (1987): "Precisiones sobre el funcionamiento del sistema kárstico del Barranco de Peñalba a partir de los caudales clasificados del manantial de Iturriotz (Vizcaya), en los ciclos 1983-84 y 1984-85". *Bol. Geol. Min.*, 91, 58-68.
- Mangin, A. (1982): "L'approche systématique du Karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques". Reunión monográfica sobre el Karst-Larra 82, *Pub. Servicio Geol. Dirección de Obras Públicas de la Diputación Foral de Navarra*, 141-157.
- Mangin, A. (1984): "Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale". *Hydrology*, 67, 25-43.
- Ramon-Lluch, R. y Cruz-Sanjulián, J. (1986). "Automatización en microcomputador del análisis correlatorio y espectral de sistemas hidrogeológicos". *Bol. Geol. Min.*, 95, 643-661.
- Rat, P. (1959): "*Les pays crétacés basco-cantabriques (Espagne)*". Thèse, Pub. Univ. Dijon, XVIII, Presses Univ. France, 525 pg., 1 mapa escala 1:200.000.

Recibido el 20 de Mayo de 1986  
Aceptado el 25 de Julio de 1987