

CARACTERIZACION DEL SISTEMA KARSTICO DE OLALDE A PARTIR DEL ANALISIS DEL HIDROGRAMA DEL MANANTIAL

J. J. Cruz-Sanjulián y T. Morales (*)

RESUMEN

El manantial de Olalde es la principal surgencia del sistema kárstico constituido por las calizas de San Miguel de Ereñozar; el acuífero es recargado además, a través de sumideros, por la escorrentía superficial de cuencas endorreicas ocupadas parcialmente por materiales impermeables. El caudal medio del manantial es de 240 l/seg con una notable variabilidad: el caudal era de 2633 l/seg al comienzo de la decrecida estudiada en este trabajo y de 18 l/seg el último día considerado. El coeficiente de agotamiento α tiene un valor de 0.032 día⁻¹ y la duración de la decrecida propiamente dicha es de 21,5 días. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración η' y del coeficiente de heterogeneidad ξ son, respectivamente, 0.0465 día⁻¹ y 3,49 día⁻¹. Los parámetros i (=0.114) y k (=0.025) indican una decrecida muy rápida y un escaso poder regulador, lo que corresponde a sistemas muy karstificados con redes de drenaje subterráneo muy desarrolladas, propias del dominio de las redes espeleológicas. Todo ello pone de manifiesto unas perspectivas de regulación del manantial poco favorables y que, en todo caso, afectarían a una pequeña fracción de las aportaciones totales.

Palabras clave: Hidrogeología kaústica, Unidad Santa Eufemia-Ereñozar, calizas urgonianas, recursos hídricos, manantial de olalde, análisis de la curva de recesión.

ABSTRACT

The Olalde spring is the main drain of the karstic system of the limestone of San Miguel de Ereñozar; the aquifer is also recharged through sinks (ponors), by the surface runoff from drained closed basins, partially occupied by impermeable materials. The mean flow of the spring is 240 l/sec, with a very high variability: the flow was 2633 l/sec at the beginning of the recession curve analyzed here and 18 l/sec the last day considered. The value of the depletion coefficient α is 0.032 day⁻¹ and the duration of the recession curve "sensu stricto" is 21.5 days. The values of the velocity of infiltration coefficient η' and the heterogeneity coefficient ξ are, respectively, 0.0465 and 3.49 day⁻¹. The parameters i (=0.114) and k (=0.025) suggest a very fast recession and a very poor regulation power; this behaviour is typical of intensely karstified systems with a very well developed subterranean drainage network which are characteristic of the realm of huge speleological caves. These facts reveal that the prospects of regulation of the spring are not very promising and would involve, in any case, a small part of the whole discharge.

Key words: Kaustic Hydrogeology, Santa Eufemia-Ereñozar Unit, Urgonian limestone, Olalde spring, analysis of the recession curve.

Introducción

El sistema de Olalde forma parte de la unidad Santa Eufemia-Ereñozar, situada en la zona nororiental de Vizcaya, y constituída fundamental-

mente por calizas urgonianas, acompañadas localmente por calizas wealdenses y jurásicas (Morales y Cruz-Sanjulián, 1986).

Las calizas de San Miguel de Ereñozar constituyen el flanco Sur de una estructura anticlinal

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

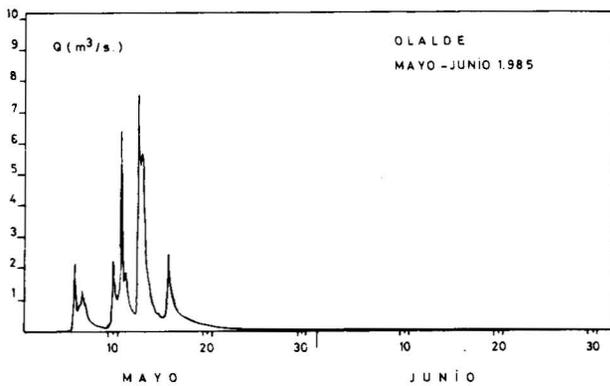


Fig. 2.—Hidrograma del manantial de Olalde en el período Mayo-Junio de 1985.

con núcleo en materiales wealdenses. Estas calizas dan lugar a un relieve alargado en dirección NW-SE, que culmina en el vértice San Miguel de Ereñozar (454 m). En el extremo noroccidental del afloramiento una estructura de fractura pone en contacto las calizas con materiales triásicos diapíricos; en el extremo suroriental las calizas pasan lateralmente a materiales detríticos urgonianos y por el Sur se hunden bajo las argilitas y areniscas del Complejo supraurgoniano (Fig. 1).

El manantial de Olalde, situado unos 3 kilómetros al NE de Guernica, a una cota de 10 metros, representa el drenaje principal de las calizas de San Miguel de Ereñozar. Este manantial surge en los niveles más altos de la secuencia carbonatada, en los que la karstificación está más desarrollada. Al Norte de este manantial, en los términos basales de la formación caliza, existe un grupo de manantiales, las surgencias de Ikoakone, a una cota de 25 metros, con un caudal sensiblemente inferior, del orden de la decena de l/seg. El manantial de Olalde, por su parte, tiene un caudal medio de 240 l/seg (período Octubre 1983-Septiembre 1985), medido en estación de aforo de lámina delgada rectangular con contracción lateral.

Sin embargo, la variabilidad del caudal de Olalde es muy acusada. El caudal máximo registrado supera los 11.000 l/seg, mientras el mínimo se ha estimado en 15-20 l/seg, sin que pueda precisarse en mayor grado, debido a la existencia de tomas de agua inmediatamente antes de ser registrado el caudal por la estación de aforo. En efecto, las crecidas en el manantial son muy acusadas, de modo que se alcanzan con facilidad caudales punta superiores a 5 m³/seg, y las decrecidas son también muy rápidas (Fig. 2). Estos hechos evidencian una red kárstica muy desarrollada, con un poder de regulación muy escaso. De hecho, todo parece indicar que la karstificación más

intensa está restringida a los niveles basales y, sobre todo, del techo del paquete calizo.

Así, el manantial de Olalde drena no sólo la mayor parte de la superficie del afloramiento calizo de Ereñozar sino también zonas endorreicas situadas al Norte y al Sur del mismo, ocupadas parcialmente por materiales impermeables, cuya escorrentía superficial recarga el sistema kárstico a través de espectaculares sumideros. Ello da lugar a un sistema complejo, descrito en un trabajo anterior (Morales y Cruz-Sanjulián, 1986). En dicho trabajo se establece que, en coincidencia con los datos de lluvia útil de la región (760 mm/año), la superficie total drenada por Olalde es de 11.7 km², de los que 6.5 corresponden al afloramiento calizo y el resto a materiales detríticos de cuencas endorreicas. Ello supondría unas aportaciones totales del manantial de 8.9 Hm³/año (año hidrológico 1984-1985). No obstante, la regulación natural del sistema es muy deficiente, mientras que los ya mencionados rasgos de la karstificación sugieren que son limitadas las posibilidades de abordar una regulación artificial. Precisamente el interés de cuantificar tales características han aconsejado aplicar a este manantial el método de análisis de la curva de decrecida propuesto por Mangin (1970, 1975).

Análisis de la curva de decrecida: fundamento

La respuesta de una surgencia kárstica ante una recarga determinada está fuertemente condicionada por las propiedades físicas del acuífero. Ello permite que del análisis del hidrograma de tales surgencias pueda obtenerse información de importancia acerca de las características del acuífero correspondiente.

La curva de decrecida (comprendida entre la punta de una crecida y el comienzo de la crecida siguiente) es la que, desde esta perspectiva, presenta mayor interés (Mangin, 1970 y 1975). Este autor, que utiliza el término de "curva de recesión" para este tramo del hidrograma, propuso un modelo de análisis que pretende caracterizar mediante parámetros simples las dos partes en que se puede dividir dicha curva en régimen no influenciado: una primera parte (decrecida propiamente dicha), en la que el caudal disminuye rápidamente, y una segunda (agotamiento), en la que el caudal disminuye lentamente de forma exponencial. De este modo, la parte decreciente del hidrograma puede ser considerada como la suma de dos componentes, según la expresión (Mangin, 1975):

$$Q_{(t)} = \Psi_{(t)} + \Phi_{(t)} \quad (\text{Fig. 3})$$

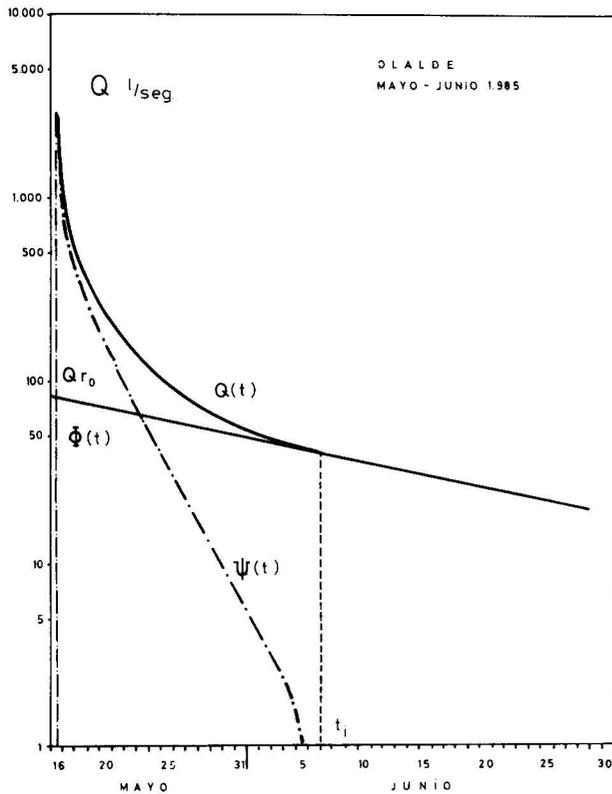


Fig. 3.—Descomposición de la curva de decrecida del manantial de Olalde en los meses de Mayo y Junio de 1985.

$\Phi_{(t)}$ representa el agotamiento y depende sobre todo de la zona saturada del Karst. La expresión matemática más adecuada para la variación de las aportaciones de esta componente es la fórmula de Maillet: $\Phi_{(t)} = Q_0 e^{-\alpha t}$, donde Q_0 es el caudal en un instante del agotamiento y t el tiempo transcurrido desde ese momento; habitualmente se considera el origen de los tiempos en el comienzo del agotamiento, si bien para el análisis de la curva de decrecida en su conjunto resulta cómodo hacerlo coincidir con la punta de la decrecida (Q_{r_0}); ello supone la extrapolación de la ecuación del agotamiento, ecuación que en realidad sólo tiene significado físico durante éste. El agotamiento viene así caracterizado por el coeficiente α , de dimensiones T^{-1} , que se calcula por el método convencional; su determinación permite evaluar la importancia de las reservas (sobre la cota de la surgencia) por integración de la ecuación de Maillet.

$\Psi_{(t)}$ traduce el efecto de la infiltración en la surgencia, es decir, la función infiltración modulada por su transferencia a través del Karst saturado, pero tiene en cuenta también el comportamiento propio de la zona saturada durante la de-

crecida (Mangin, 1975). Según este autor, la función empírica $\Psi_{(t)}$ puede ajustarse a una función homográfica del tipo:

$$\Psi_{(t)} = q_0 \frac{1 - \eta' t}{1 + \xi t}$$

definida entre $t_0 = 0$ (momento de la crecida y $t_i = 1/\eta'$ (comienzo del agotamiento y, por tanto, duración de la decrecida), y caracterizada por dos parámetros, ambos de dimensiones T^{-1} :

- η' : “Coeficiente de velocidad de infiltración”, que traduce la duración de la infiltración o, más propiamente quizá, la duración de la transferencia de la infiltración hasta el manantial.
- ξ : “Coeficiente de heterogeneidad”, que traduce la importancia de la concavidad de la curva: cuanto mayor es su valor tanto más rápidamente se realiza la decrecida en los instantes iniciales, para ralentizarse a continuación considerablemente.

El parámetro η' se calcula a partir del valor de t_i ($\eta' = 1/t_i$). Por su parte, para el cálculo de ξ , se realiza un cambio de variable con objeto de linealizar la función:

$$-y = \frac{t_i - t}{q^*}$$

siendo $q^* = q_0 (1 - \eta' t) / (1 + \xi t)$, donde q_0 representa la diferencia entre el caudal de la punta de la crecida y el correspondiente a la extrapolación del agotamiento hasta la ordenada de aquélla. El valor de ξ resulta ser:

$$\xi = \frac{q_0 - q^*}{q^* t} - \frac{\eta' q_0}{q^*}$$

Para calcular ξ , se escogen aquellos valores de t que presenten un buen alineamiento sobre la recta obtenida por el cambio de variable anteriormente mencionado.

La determinación de estos dos parámetros permite calcular la función “ y ”, cuyo valor oscila entre 0 y 1:

$$y = \frac{\Psi(t)}{q_0} = \frac{1 - \eta' t}{1 + \xi t}$$

Según Mangin (1975), esta función es independiente de la amplitud de la crecida. El análisis de diferentes decrecidas en una misma surgencia conduce a obtener una familia de funciones “ y ”

que caracterizan el tipo de sistema. El valor de esta función para $t=2$ días (parámetro "i"), junto con la relación existente entre el "volumen dinámico" (almacenado al comienzo del agotamiento) y el volumen emitido en un ciclo, sirven para clasificar el sistema y como criterios de comparación con otros sistemas kársticos.

Caracterización del agotamiento

De la serie de datos disponibles del manantial de Olalde (desde Junio de 1983 hasta el momento de redactar esta nota en Febrero de 1986), se ha seleccionado para este análisis el período comprendido entre el 16 de Mayo y el 30 de Junio de 1985. El caudal punta de la curva de "recesión" estudiada fue de 2.633 l/seg., aunque hubo crecidas importantes en los días inmediatamente anteriores, en una de las cuales llegaron a superarse los 7 m³/seg. (Fig. 2).

El período estudiado ha sido elegido en virtud de que permite una buena caracterización del agotamiento con un estiaje prolongado; y ello a pesar de que durante la decrecida se produjeron precipitaciones esporádicas que totalizaron 13 mm. en los restantes días de Mayo y 36 mm. en Junio, si bien estos últimos distribuidos en cantidades relativamente pequeñas, en días separados entre sí. De hecho, el efecto en el hidrograma de tales lluvias es inapreciable (Fig. 2).

Es necesario señalar que el estiaje se prolongó en este caso excepcional hasta el mes de Noviembre de 1985, con escasísimas precipitaciones en el período; no obstante, tales datos no se han considerado en la caracterización del hidrograma, debido a que los efectos de los bombeos continuados a que ha sido sometido el manantial en tales condiciones de sequía han afectado sensiblemente los limnigramas y ello proporcionaba una fiabilidad limitada a los datos de caudal procedentes de dicho registro.

Se dispone de archivo informatizado de los datos de caudal de este manantial cada dos horas, obtenidos por tratamiento automático en computador de los limnigramas correspondientes (Fig. 2), de acuerdo con el método puesto a punto en este Departamento (Cruz-Sanjulian, 1985). Sin embargo, los datos del estiaje analizado han sido además tratados manualmente, al objeto de corregir de la forma más precisa posible los pequeños efectos del mencionado bombeo.

De esta forma, se ha podido identificar con claridad el agotamiento, que comienza a los 21,5 días del caudal punta (Fig. 3) y está caracterizado por un coeficiente $\alpha=0.032$ días⁻¹.

Determinación de los parámetros de la decrecida

La duración de la decrecida anteriormente mencionada condiciona un valor para el coeficiente de velocidad de infiltración $\eta'=0.0465$ días⁻¹.

El cambio de variable propuesto por Mangin (1975) para el cálculo de ξ , da lugar en nuestro caso a una buena alineación para valores de t comprendidos entre 0,5 y 5,5 días (Fig. 4). Ello permite establecer un valor para el coeficiente de heterogeneidad de $\xi=3,49$ días⁻¹.

A partir de los parámetros ξ y η' se calcula el valor de la función "y" (Fig. 5). Resulta evidente que esta función muestra una concavidad muy marcada, lo que corresponde a una disminución muy rápida de los caudales durante la decrecida, circunstancia que ya se había puesto de manifiesto a partir de la observación del hidrograma. El parámetro "i" permite cuantificar la forma de la decrecida; su valor corresponde al de la función "y" para $t=2$ días; en el caso de la decrecida estudiada en el manantial de Olalde $i=0.114$, valor bastante bajo, que corresponde, como ya se ha dicho, a curvas de gran concavidad y, por tanto, de decrecida rápida.

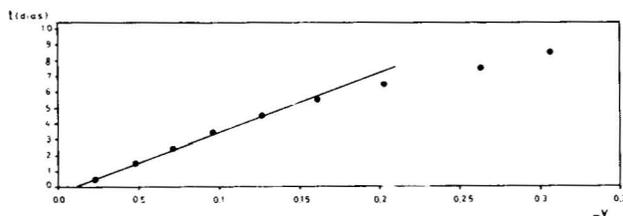


Fig. 4.—Linearización de la función (t).

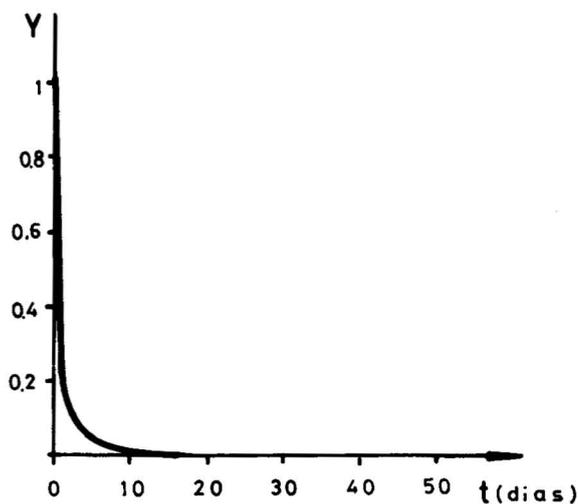


Fig. 5.—Forma de la decrecida (función "y").

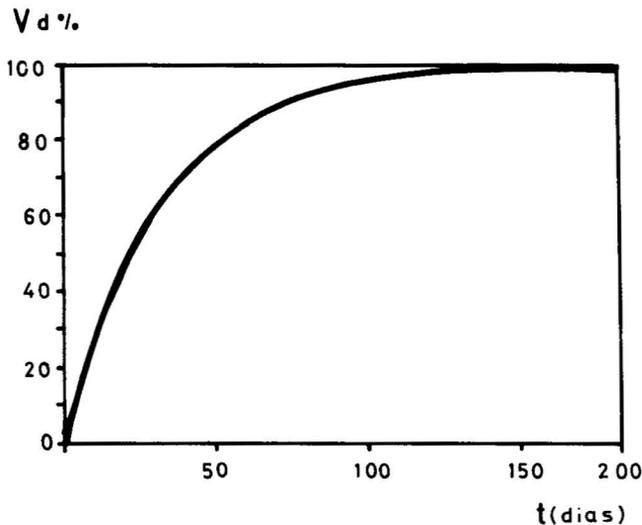


Fig. 6.—Evolución del volumen dinámico emitido en función del tiempo.

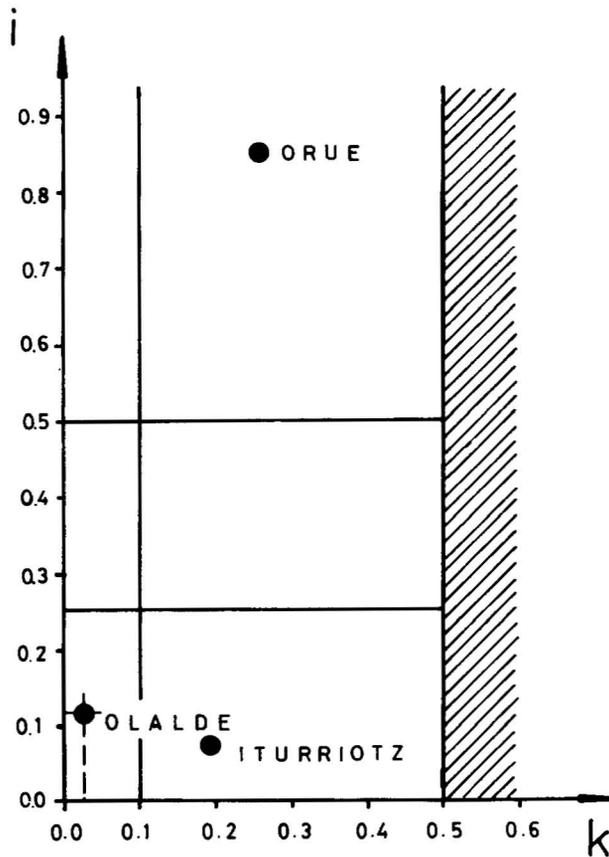


Fig. 7.—Clasificación del sistema de Olalde en función del valor de los parámetros "i" y "k".

Volumen dinámico y volumen global de tránsito

El volumen dinámico (V_d) puede ser definido como el volumen almacenado en la zona saturada del acuífero, cuya circulación determina las variaciones del caudal del manantial durante el agotamiento. Como es sabido, este volumen se calcula por integración de la ecuación de Maillet, a partir de los valores del coeficiente de agotamiento obtenido en un apartado anterior y del caudal de base que, en el caso del agotamiento estudiado en Olalde, es de 81 l/seg. De este modo, para el estiaje considerado, el volumen dinámico resulta ser $V_d=0.22 \text{ Hm}^3$.

La Fig. 6 representa el porcentaje del volumen dinámico emitido por el manantial en función del tiempo, extrapolando las condiciones que caracterizan el agotamiento identificado en Olalde. Como puede observarse, el vaciado es bastante rápido, de modo que bastarían 22 días para emitir el 50% del volumen dinámico y a los 72 días habría circulado el 90% de aquél.

El volumen global de tránsito (V_t) corresponde al volumen emitido por el sistema en un ciclo de 365 días, considerando el caudal medio del manantial. Mangin (1975) denomina parámetro k a la relación entre el volumen dinámico y el volumen global de tránsito; este parámetro tiene interés en orden a caracterizar de forma cuantitativa el funcionamiento de los acuíferos kársticos y a permitir la comparación de distintos sistemas entre sí.

En el sistema de Olalde se ha obtenido un valor de $k=V_d/V_t=0.025$.

Clasificación del sistema de Olalde y conclusiones

La clasificación de sistemas kársticos a partir del análisis de la decrecida, según el método propuesto por Mangin (1975), se basa en los valores de los parámetros "i" y "k" que caracterizan, respectivamente, la forma de la decrecida y la capacidad de regulación del sistema: los valores bajos de "i" corresponden a decrecidas rápidas, y los valores bajos de "k" a sistemas con deficiente regulación.

Esta clasificación se visualiza en el gráfico propuesto por Mangin (op. cit.), en el que se representan los valores de "k" en abscisas frente a los de "i" en ordenadas (Fig. 7). De este modo, cada sistema (o más propiamente, cada decrecida de un sistema) estará representado por un punto cuya posición reflejará las características de aquél. Según el mismo autor, los sistemas con

$k > 0.5$ corresponden a acuíferos porosos no kársticos.

El punto correspondiente al manantial de Olalde resulta estar situado en este gráfico (Fig. 7) en el área en la que $i < 0.25$ y $k < 0.1$; de acuerdo con ello, el funcionamiento del manantial de Olalde es propio de sistemas muy karstificados en los que la red de drenaje subterráneo está particularmente bien desarrollada, lo que corresponde por excelencia al dominio de las redes espeleológicas.

Es oportuno recordar, en este sentido, que el estudio hidrogeológico de superficie evidenciaba la existencia de una karstificación intensa, sobre todo en los niveles más altos de la secuencia carbonatada, en los que se sitúan precisamente tanto el manantial de Olalde como una serie de zonas endorreicas que indudablemente alimentan a aquél; la más notable de ellas es la del valle de Oma, cuya escorrentía superficial se infiltra en el sistema kárstico a través del sumidero de Boluntzate, de grandes dimensiones; de igual modo, es destacable la existencia en el mismo relieve de San Miguel de Ereñozar de las cuevas de Santimamiñe, conocidas por sus pinturas rupestres.

Todo ello sugiere que el sistema que alimenta a Olalde está constituido por una red de grandes conductos en los que buena parte de la circulación debe realizarse en condiciones libres. En consecuencia, y sin que pueda descartarse la presencia de una zona saturada por debajo de la cota del manantial, favorecida por las condiciones estructurales, las perspectivas de regulación del sistema son poco halagüeñas y afectarían en todo caso a un porcentaje no demasiado grande de las aportaciones totales de Olalde.

Es digno de señalar que estas características son frecuentes en los sistemas kársticos vizcaínos. En la Fig. 7 se facilitan, además de los de Olalde, los datos correspondientes a los sistemas de Orue (Antigüedad *et al.*, 1984) y de Iturriotz (Cruz-Sanjulian *et al.*, 1987).

En este último se advierten valores de "i" todavía más bajos que los de Olalde, lo que indicaría una decrecida todavía más rápida; en cuanto al valor de k, próximo a 0,2, los autores (Cruz-Sanjulian *et al.*, 1987) sugieren que puede deberse a

la influencia indirecta de la recarga del sistema en estiaje, a partir de aguas superficiales aportadas por pequeños manantiales en materiales detríticos de la cabecera de la cuenca, más bien que a la existencia de una importante zona saturada por debajo del manantial, como propone Mangin (1975) para ese rango de valores.

Por lo que se refiere a Orue, resulta ser un caso poco común entre los sistemas vizcaínos ya que junto a un cierto poder regulador muestra una decrecida muy lenta. De hecho, dicho manantial corresponde a un sistema complejo (Antigüedad *et al.*, 1984).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del "Estudio Hidrogeológico de Vizcaya", realizado en este Departamento para la Diputación Foral del Señorío, a través de la Fundación Euskoiker. A la Excma. Diputación agradecemos su colaboración y la autorización para publicar los presentes datos.

Referencias

- Antigüedad Auzmendi, I.; Eraso Alberdi, A. y Cruz-Sanjulian, J. (1984). "Análisis e interpretación de las curvas de recesión correspondientes a dos surgencias kársticas en la provincia de Bizkaia-Vizcaya". *I Congreso Español de Geología*, 4, pp. 17-27.
- Cruz-Sanjulian, J. (1984). "Tratamiento automático de limnigramas en microcomputador". *Bol. Geol. Min.*, 95, 456-462.
- Cruz-Sanjulian, J.; García-Latorre, F. e Ibarra-Lozano, V. (1987). "Delimitación del sistema kárstico del manantial de Iturriotz (Trucios, Vizcaya): su caracterización a partir del análisis del hidrograma". *Bol. Geol. Min.*, 98, 782-792.
- Mangin, A. (1970). "Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement". *Ann. Spéléol.*, 25, 581-610.
- Mangin, A. (1975). "Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques". Thèse; Première partie: "Généralités sur les Karst et les lois d'écoulement utilisées". *Ann. Spéléol.*, 1974, 29, 283-332. Deuxième partie: "Concepts méthodologiques adoptés. Systèmes karstiques étudiés". *Ann. Spéléol.*, 1974, 29, pp. 495-601. Troisième partie: "Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques". *An. Spéléol.*, 1975, 30, pp. 21-124.
- Morales, T. y Cruz-Sanjulian, J. (1986). "Hidrogeología de la unidad de Santa Eufemia-Ereñozar (Vizcaya): el sistema kárstico de Olalde". *Estudios geol.*, 42, 445-450.

Recibido el 3 de Abril de 1986
Aceptado el 11 de Marzo de 1987