Análisis de respuesta de Fuenmayor (San Julián de Banzo, Huesca). Primeros resultados

Analysis of the response of Fuenmayor spring (San Julián de Banzo, Huesca). First results.

J. L. Villarroel [1,3] y J. A. Cuchí [2,3]

[1] Dpto de Informática e Ingeniería de Sistemas. Centro Politécnico Superior. C/María de Molina 3. 50071-Zaragoza.
[2] E. Politécnica Superior de Huesca. Cª.Cuarte s/n. 22071-Huesca.
[3] Grupo de TecnoEspeleología. Universidad de Zaragoza-Peña Guara.

ABSTRACT

The hydrologic data of the karstic spring of Fuenmayor (Huesca) the from september til december, 2000, are presented. After the test of some of the classic methods for recession limb, the work focused on the system theory. It has been tested the single reservoir model. A second line of work was the identification of a transfer function.

Key Words: *karst, Prepirineo, spring analysis, systemic analysis.*

Geogaceta, 31 (2002), 71-74
ISSN:0213683X

Introducción

El manantial kárstico de Fuenmayor se encuentra al pie de las sierras prepirenaicas, entre los dos barrios de la pequeña localidad de San Julián de Banzo, municipio de Loporzano, (Huesca). Utilizado desde finales del siglo XIX para abastecer a Huesca, la irregularidad de sus caudales junto con la insuficiencia de sus caudales estivales aconsejaron realizar diversos estudios y actuaciones que se resumen en Cuchí *et al.*, (2001).

En este último trabajo, una serie de datos muestran que existe una clara inercia en la química y temperatura del agua, a pesar de significativas variaciones de caudal, en respuesta a las precipitaciones.

La lluvia aumenta el caudal del manantial. También modifica de modo más amortiguado la temperatura y conductividad eléctrica del agua. Esto parece indicar la existencia de reservas subterráneas de alguna importancia que también justificarían la edad obtenida mediante tritio. Evidentemente esta hipótesis necesita un análisis lluvia-caudal más detallado.

Material y métodos

Para estudiar en detalle la respuesta del manantial a las precipitaciones se ha diseñado una estación hidrológica instalada en el edificio anejo al manantial.

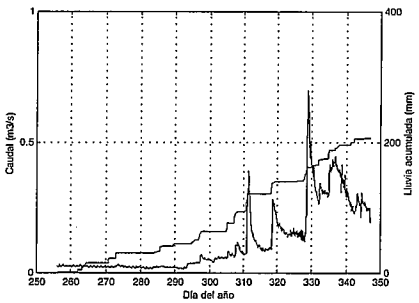

Fig. 1.- Lluvia y evolución del caudal en Fuenmayor entre septiembre y diciembre 2000.

Fig. 1.- Rainfall and evolution of discharge at Fuenmayor from september til december 2000.

Consta de un pluviógrafo Young 52202, una sonda PT 100 de temperatura de agua, una sonda de conductividad Global water WQ301 y dos sondas de presión PDCR 130/D como medidores de nivel de agua en cada uno de los vertederos.

El pluviógrafo está situado en el tejado del edificio del manantial. La sonda de temperatura sumergida, en sombra, inicio de la zona de emergencia permanente del manantial. La sonda de conductividad eléctrica está colocada bajo el edificio, en los canales divisores. Las sonda de presión, aguas arriba de los vertederos e inmediatas a las escalillas.

Salvo los datos del pluviógrafo, los restantes se miden con frecuencia horaria y se almacenan en un datalogger Campbell CR10X-2M, que se descarga periódicamente a un PC portátil Toshiba Satellite 4030 CDS mediante el software PC208W. La instalación se alimenta mediante baterías de 12 voltios que se cambian periódicamente. El mantenimiento, reparaciones y modificaciones se realizan por los autores del trabajo.

Evolución de parámetros.

Los datos obtenidos, corresponden a los días julianos 255 (11 de septiembre) y 345 (10 de diciembre). A partir de esta fecha cesó la medición en el sensor de un vertedero por los mordiscos de una gineta que seccionó el cable. Las figuras 1 a 3, presentan la evolución del caudal, conductividad eléctrica y temperatura en Fuenmayor en el segundo semestre de 2000.

Hasta mediados de octubre, el caudal del manantial está en fase descendente, a pesar de algunas lluvias de poco volumen. El agua de este periodo se almacena en el suelo y epikarst y debe de ser consumido, al menos parcialmente, por la vegetación.

A partir del día 293, el caudal aumenta por las lluvias de otoño y, probablemente, por el descenso de la temperatura atmosférica. Hasta el día 310 es muy modesto el efecto de la lluvia, hasta que se reconstruye la reserva de agua en suelo y epikarst.

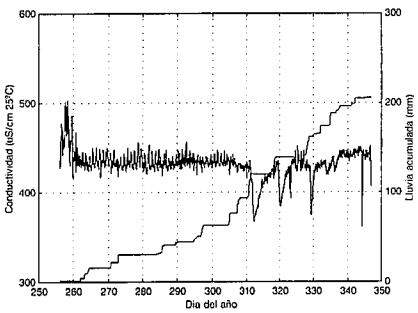

Fig. 2.- Evolución de la conductividad eléctrica en Fuenmayor entre septiembre y diciembre 2000.

Fig. 2.- Evolution of the electrical conductivity at Fuenmayor from september til december 2000.

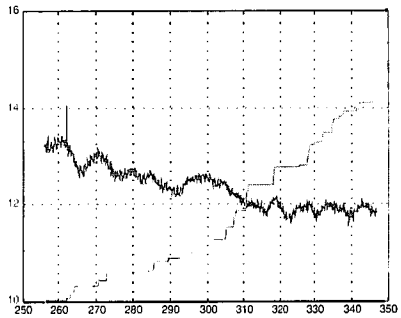

Fig. 3.- Evolución de la temperatura del agua en Fuenmayor entre septiembre y diciembre 2000.

Fig. 3.- Evolution of the temperature of the water at Fuenmayor from september til december 2000.

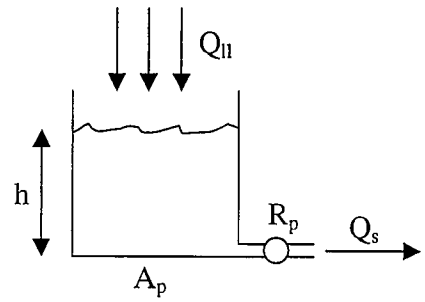

Fig. 4.- Modelo de un depósito de un manantial kárstico. A_p: área del depósito, h: altura de agua en el depósito, R_p: resistencia hidráulica, Q_{ll}: caudal de lluvia que entra al sistema, Q_s: caudal en la surgencia.

Fig. 4.- Reservoir model of a karstic spring. A_p: reservoir surface, h: water height at the reservoir, R_p: hidraulic resistance, Q_{ll}: input of rainfal discharge, Q_s: spring discharge.

La conductividad eléctrica se mantiene constante durante el estiaje, entorno a los 420 microSiemens/cm. Los episodios de lluvia disminuyen temporalmente este parámetro, que se recupera en pocos días en la mayor parte de los episodios. En mayo del mismo año, fuera del periodo presentado, se observó un incremento de la conductividad asociado a una lluvia de barro. Aunque no se ha determinado la conductividad eléctrica de la lluvia en San Julián de Banzo, datos de este parámetro en Huesca, no publicados, oscilan en un rango entre 20 y 50 microSiemens/cm.

La temperatura del agua desciende ligeramente conforme lo hace la temperatura ambiente. En la primavera se observó el proceso contrario. El manantial muestra una ligera evolución diaria y una respuesta suave a las precipitaciones.

Retraso de la respuesta.

Desde tiempo antiguo se conoce que el caudal de Fuenmayor responde con algún retraso a las precipitaciones. Según el guarda del manantial, éste es del orden de 7 horas. Trilla y Pascual (1974) señalan que el aumento sensible del caudal tenía lugar alrededor de 8 horas después de las precipitaciones.

A partir de los datos obtenidos de las seis respuestas en caudal más importantes del segundo semestre de 2000, se ha obtenido la tabla 1.

Los resultados son, evidentemente, del orden de lo observado empíricamente. Sin embargo se observan ligeras desviaciones, que indican diferencias en la respuesta del manantial.

Estimación del área de recarga

Debido a razones estructurales, no es fácil definir áreas de recarga en la mayoría de los manantiales kársticos del Prepirineo aragonés. En la práctica totalidad de los casos hay que realizar aproximaciones a partir de criterios litológicos, estructurales y geomorfológicos.

Para Fuenmayor, Cuchí *et al.*, (2001) estiman que la superficie total del acuífero, incluidos los conglomerados de la Baldonsera, no supera los 10 km^2. Este valor es algo inferior a los 15 km^2, que estimaron Trilla y Pascual (1974), superficie recogida por otros autores posteriores.

La existencia de datos detallados de lluvia y caudal permite realizar una estimación a partir de un balance simplificado de agua. A partir de la hipótesis de una infiltración del 100%, y suponiendo también una evapotranspiración despreciable, se ha realizado un balance volumétrico del agua a partir de yetogramas e hidrograma durante el periodo de estudio. Se considera, además, que el hidrograma, entre el estiaje veraniego y los últimos datos, refleja que toda el agua aportada por la lluvia sale por el manantial. Como el obtenido no llega a un estiaje real, se prolonga ficticiamente mediante una curva de agotamiento exponencial.

El volumen de agua que ha entrado es igual a la integral de la intensidad de lluvia caída multiplicada por el área de recarga del manantial. La cantidad de agua que ha salido es la integral del hidrograma en función del tiempo.

A partir de las correspondientes operaciones se obtiene un volumen de hidrograma de 926.060 m^3, a los que hay que sumar 34.042 m^3 correspondientes al agotamiento hasta el estiaje. Esto proporciona un volúmen total de 960.102 m^3

Las entradas de lluvia medidas con el pluviómetro en el periodo considerado ascienden a 0,2063 m^3/m^2.

A partir de la ecuación: Area_recarga * Lluvia total = Vtotal, se obtiene un área de recarga de 4,65 km^2.

Dadas las simplificaciones realizadas, el área real tiene que ser superior a este valor. En todo caso el resultado es coherente con la superficie obtenida por otros criterios.

Análisis de manantiales kársticos

El análisis de las evoluciones de los hidrogramas de los manantiales de acuíferos kársticos se ha realizado tradicionalmente en dos líneas de trabajo diferentes.

1. Realizando el análisis de la curva de agotamiento de hidrogramas simples, a partir del ajuste de diversas ecuaciones (Pulido Bosch, 1987; Ford y Williams, 1989). El objetivo es determinar α, coeficiente de recesión o agotamiento. Este parámetro caracteriza el tiempo de respuesta del manantial ya que es el inverso de la constante de tiempo del sistema. (White, 1988).

2. A partir del análisis correlatorio y espectral, (Mangin, 1984; Pulido Bosch, 1989), que permite caracterizar los manantiales con cuatro parámetros principales. Pulido Bosch (1989): Efecto memoria (o inercia del sistema), Banda espectral (comportamiento frecuencial), Tiempo de regulación e Hidrograma unitario (correlograma cruzado).

Coeficientes de agotamiento

A efectos de conocer el comportamiento del manantial, se han estudiado las ramas descendentes de algunos hidrogramas simples.

Con los datos del evento de los días 328 y 329 (23 y 24 de diciembre), se ob-

día	297	306	307	310	318	328
pico	1	2	3	4	5	6
retraso (horas)	7,2	9,6	9,4	9,6	7,5	9,6

Tabla 1.- Tiempo de retraso a la lluvia de Fuenmayor a partir de diversos picos de caudal durante el segundo semestre de 2000.

Table 1.- Lag time to the rainfall at Fuenmayor, from several discharge peaks during the second semester 2000.

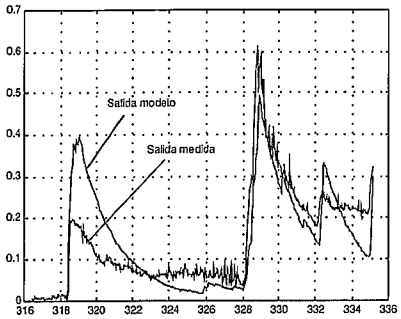

Fig. 5.- Caudal de salida medido del manantial de Fuenmayor y caudal simulado utilizando un modelo de primer orden.

Fig. 5.- Measured discharge at Fuenmayor spring and simulated discharge using a first order model.

serva que α no es constante para la ecuación clásica de Maillet. Aplicando una función doble exponencial, como sugieren Ford y Williams (1989), se obtiene, para n = 0,6 un valor de α próximo a 0,5. Ambos parámetros son similares a los que encuentran Trilla y Pascual (1974). Sin embargo, estudiando otros hidrogramas se obtienen valores diferentes de α, en función del caudal, que sugieren una dinámica más compleja y la existencia de no linealidades.

En esta línea se ha pensado en utilizar la teoría de sistemas como una herramienta de trabajo.

Aproximación sistémica

Desde el punto de vista de la Teoría de Sistemas, un manantial kárstico es un sistema de múltiples entradas (lluvia, temperatura y humedad ambiente) y múltiples salidas (caudal, temperatura, conductividad del agua). Como la mayoría de los sistemas naturales presenta comportamientos no lineales. Se supone inicialmente que el comportamiento del manantial puede ser aproximado por un modelo lineal. Este puede ser representado de diversas formas, entre ellas las más clásicas: representación interna mediante ecuaciones de estado o representación externa mediante funciones de transferencia. Cada una de estas formas de representación tiene sus propias técnicas de modelado, análisis e identificación.

Para ilustrar las posibilidades del uso de la teoría de sistemas en manantiales kársticos, el estudio se ha centrado únicamente en parte del problema, considerando como entrada únicamente la lluvia y como salida el caudal, y una representación, la representación externa mediante función de transferencia.

Uno de los principales objetivos que se persigue mediante la utilización de la teoría de sistemas es la obtención de un modelo que permita razonar sobre el sistema. Esto es, realizar análisis para estudiar su comportamiento temporal y frecuencial, realizar simulaciones que permitan poner de manifiesto el comportamiento del sistema ante ciertas entradas, realizar planificaciones o intentar variar su comportamiento. Para la obtención del modelo de un sistema existen dos vías: el modelado y la identificación.

El modelado consiste en establecer las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema y, a partir de ellas obtener la función de transferencia que representa el comportamiento del sistema. Obviamente para llevar a cabo esta labor es preciso un conocimiento detallado del sistema a modelar para poder establecer las ecuaciones diferenciales de su comportamiento. Este no es el caso en la mayoría de los sistemas que nos ocupan. Los manantiales kársticos suelen ocultar su estructura interna mediante conductos impenetrables y tramos inundados que sólo, a veces, desvelan una pequeña parte de su interior. Así, únicamente se pueden hacer hipótesis sobre su estructura interna, sobre las características de reservorios y conductos, con modelos como CREC, (Guibot, 1975), BEMER, (Bezes, 1976) y sobre todo por los desarrollados por Mangin (1986) para abordar el modelado y posteriormente comprobar la bondad, o no, del mismo.

Otra técnica para establecer un modelo es la identificación (véase por ejemplo Ljung (1987, 1997). Mediante esta técnica no es necesario conocer la estructura interna del sistema, dado que conociendo la entrada y la salida puede establecerse la función de transferencia del sistema. La identificación de sistemas permite la construcción de modelos de sistemas a partir de datos muestreados de las entradas y salidas. Esencialmente consiste en el ajuste de los parámetros de un cierto modelo hasta que su salida se aproxima lo máximo posible a la salida medida del sistema. Para abordar una identificación es preciso disponer de series temporales muestreadas de la entrada y salida del sistema, un conjunto de estructuras de función de transferencia a ajustar y una técnica de optimización que permita obtener los parámetros de las funciones de transferencia que minimicen el error cometido por el modelo con respecto a la salida medida del sistema.

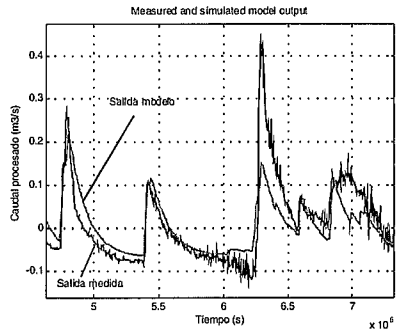

Fig. 6.- Salida del modelo identificado frente a la salida medida del manantial de Fuenmayor..

Fig. 6.- Output of the identified model against measured output of Fuenmayor spring.

Dentro del ámbito del estudio de los sistemas kársticos y para la obtención de un modelo de simulación, se ha propuesto la identificación de la secuencia correspondiente al núcleo de la integral de convolución. En este sentido, se han utilizado dos técnicas:

1. La obtención del núcleo mediante técnicas de optimización basadas en la minimización de la suma de los cuadrados del error cometido (Dreiss, 1989)
2. La utilización del correlograma cruzado como núcleo (Padilla y Pulido-Bosch, 1990). El correlograma cruzado es una estimación de la respuesta impulsional del acuífero y ésta coincide a su vez con el núcleo de convolución.

En ninguno de los trabajos citados se llega a establecer la función de transferencia del sistema. Ésta no sólo es un modelo de simulación, sino que también permite abordar otro tipo de análisis sobre la dinámica del sistema.

A continuación se abordan ambas técnicas para los datos de Fuenmayor.

Modelado

La estructura más simple en la que se puede pensar para un manantial kárstico es la de un único depósito con una resis-

tencia hidráulica de salida, tal y como muestra la figura 4.

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de este sistema son las siguientes:

$$Q_{II} - Q_s = A_p \frac{dh}{dt}$$

$$h = R_p Q_s$$

De estas ecuaciones se puede extraer la función de transferencia del sistema en el campo de la transformadada de Laplace:

$$\frac{Q_s}{Q_{II}} = \frac{1}{1 + A_p R_p s}$$

Se trata de una función de transferencia de primer orden con constante de tiempo t = Ap*Rp.

Observando en el hidrograma de la figura 1 el pico de caudal correspondiente al día 310 y asumiendo que sea la respuesta a una entrada de lluvia impulsional, la constante de tiempo del sistema se puede establecer como el tiempo transcurrido hasta que el caudal ha caído hasta un 33% del máximo del pico (sistema de primer orden). Así, t ≅ 2 días = 172800 s.

Para comprobar la bondad del modelo simularemos su respuesta a la lluvia real y la compararemos con la salida medida del sistema. Para realizar la simulación se ha incorporado a la función de transferencia un retraso puro de 8 horas y se ha calculado Q_{II} a partir del área de recarga calculada anteriormente. La Figura 5 muestra los resultados de esta simulación en comparación con la salida real medida del sistema.

Obviamente existen diferencias considerables entre el comportamiento del modelo y del sistema real, debidas a la gran sencillez del modelo utilizado. Un modelo más complejo que tenga en cuenta por ejemplo reservorios laterales en el sistema permitirá obtener mejores resultados. Sin embargo, el modelo de un depósito ha permitido ilustrar de forma sencilla la sistemática a seguir.

Identificación

Para el proceso de identificación del manantial de Fuenmayor se han utilizado las series temporales medidas de lluvia y caudal de salida. La serie del caudal ha sido preprocesada para eliminar tendencias. Es preciso hacer notar que los datos corresponden únicamente a 90 días, una parte pequeña del ciclo hidrológico. Es imposible, por lo tanto extraer de estos datos el modelo de comportamiento estacional del manantial. Por ello se ha eliminado la tendencia a largo plazo dejando únicamente la dinámica a corto plazo. Para obtener un mejor comportamiento de los algoritmos de identificación se ha retraído la media de ambas series.

En el proceso de identificación se ha trabajado las estructuras (véase Ljung (1987) ARX (AutoRegressive model with eXtra input) y OE (Output Error), con diferentes órdenes de la función de transferencia. Para facilitar y automatizar al máximo la labor de identificación se ha utilizado la "System Identification Toolbox" de "Matlab". (Ljung, 1997).

Como resultado de este proceso se ha obtenido la siguiente función de transferencia en el campo de la trasformada Z (periodo de muestreo T = 3600 s, el mismo que el de las series temporales) que es la que minimiza el error de predicción del modelo con respecto a la salida medida:

$$\frac{Q_s(z)}{Q_{II}(z)} = \frac{0.0105 - 0.008z^{-1}}{1 - 1.7868z^{-1} + 0.7917z^{-2}} z^{-7}$$

Se trata de un modelo de segundo orden con un cero y siete retrasos. En la Figura 6 puede observarse la salida de este sistema ante la lluvia real frente a la salida medida del manantial. Las técnicas de identificación permiten obtener modelos lineales óptimos con los datos disponibles. Sin embargo, sigue habiendo diferencias entre el modelo y el comportamiento real del sistema atribuibles a las no linealidades del sistema y al comportamiento estacional que no ha podido ser considerado.

Conclusiones

Del estudio de los datos obtenidos se concluye que el sistema de Fuenmayor, tiene cierta complejidad. Se trata de un modelo no lineal en cuyo estudio, tiene interés el aplicar técnicas clásicas de identificación en ingeniería de sistemas que permiten obtener modelos muy precisos del comportamiento dinámico de estos sistemas. En todo caso hay que seguir investigando sobre la optimización en el uso de modelos no lineales y sobre la interpretación del sentido físico de los mismos.

Agradecimientos

El trabajo no hubiera podido ser realizado sin la estimable colaboración y paciencia de R. Fortuño, guarda del manantial. L. Serena, del Ayto de Huesca, facilitó el acceso a las instalaciones.

Bibliografía

Bezes, C. (1976): *Contribution a la modélisation des systèmes aquifères karstiques; établissement du medele BEMER.* Thèse 3-éme cycle. U.S.T.L. Montpellier.

Cuchí, J.A., Villarroel, J.L., Manso, J.A. (2002). *Geogaceta.* 31. 125-128

Dreiss, S.J.(1989): *R. Water Ressources Research,* 25, 1. 126-134.

Ford, D., Williams, P. (1989): *Karst Geormorphology and hydrology.* Unwin Hyman. 601 p.

Guibot, A. (1975): *Modélisation des écoulements d'un aquifère karstique (liaison pluie-débit). Application aux bassins de Saugras et du Lez.* Thèse 3-éme cycle. U.S.T.L. Montpellier.

Ljung, L. (1987): *System Identification. Theory for the User.* Prentice-Hall Information and System Sciences Series.

Ljung, L. (1997): *System Identification Toolbox User's Guide.* The MathWorks Inc.

Mangin, A. (1984): *Journal of Hydrology,* 67, 25-43

Mangin, A. (1986): *J. sobre el Karst de Euskadi. S.Sebastián.* 11-29.

Pascual, I. (1974): *Estudio hidrogeológico de la surgencia kárstica de Fuenmayor (San Julián de Banzo).* Tesina. U. de Barcelona, 54 p. 1 mapa.

Padilla, A., Pulido-Bosch, A. (1990): A Reservoir Model to Simulate Karstic Aquifers". Int. Conf. *On Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, ModelCARE* 90. The Netherlands.

Pulido Bosch, A. (1987): *Geolis. I,* 18-23.

Pulido Bosch, A. (1989): *III Simposio de Hidrogeología.* 13-23.

Trilla, J y Pascual, I. (1974): *Agua,* 87, 20-28.

White, W. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains.* Oxford Univ. Press. 464 p.