

# MODELING THE OBSERVED HYDROGRAPH RECESSION OF A SMALL SEMIARID WATERSHED

## MODELACIÓN DE LAS CURVAS DE RECESIÓN DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS EN UNA CUENCA SEMIÁRIDA PEQUEÑA

Gerardo Núñez-González\*, Miguel Á. Domínguez-Cortazar, Eusebio Jr. Ventura-Ramos, Aldo I. Ramírez

División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario. 76010. Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Querétaro, México. (gerardo.nunez@uaq.mx).

### ABSTRACT

The recession curve of observed hydrographs was modeled based on the concept of linear reservoirs. Each of the recession limbs was fitted using a non-linear curve fitting procedure based on Levenberg-Marquardt algorithm. The results showed that in general the response of this watershed is primarily non-linear. Besides, the recession of the observed hydrographs showed a good fit by means of a two linear reservoirs model with parallel discharge. The mean residence time for this watershed varied between 0.1 and 6 h for direct runoff, while it ranged between 0.7 and 18.5 h for subsurface flow. Finally, it was founded that subsurface flow is an important component of the hydrographs. From these results it can be concluded that hydrograph recession analysis technique could be useful in order to obtain a better insight about the runoff components as well as the recession process in watersheds of semiarid zones.

**Key words:** hydrograph analysis, surface flow, subsurface flow.

### INTRODUCTION

The understanding of hydrological processes at watershed scale is an important task in order to optimize management of the available surface water and groundwater resources, as well as for the development of hydrological models (Maldonado-de León *et al.*, 2001; Torres-Benites *et al.*, 2005; Paz-Pellat, 2009). Ephemeral streams, which flow only in rainy season, are the predominant

### RESUMEN

La curva de recesión de hidrogramas observados se modeló con base en el concepto del reservorio lineal. Cada una de las curvas de recesión se ajustó usando un procedimiento de ajuste de curvas no lineal, basado en el algoritmo de Levenberg-Marquardt. Los resultados mostraron que en general la respuesta de la cuenca es principalmente no lineal. Además, la recesión de los hidrogramas observados mostró un buen ajuste por medio del modelo de dos reservorios lineales con descarga paralela. El tiempo medio de residencia en la cuenca varió entre 0.1 y 6 h para el escurrimiento directo, y entre 0.7 y 18.5 h para el flujo subsuperficial. Por último, se encontró que el flujo subsuperficial es un componente importante de los hidrogramas. Con estos resultados se puede concluir que la técnica de análisis de la recesión de hidrogramas podría ser útil para tener una mejor comprensión acerca de los componentes del escurrimiento, así como del proceso de recesión en las cuencas de zonas semiáridas.

**Palabras clave:** análisis de hidrogramas, flujo superficial, flujo subsuperficial.

### INTRODUCCIÓN

La comprensión de los procesos hidrológicos a escala de cuenca es una tarea importante para optimar el manejo de los recursos hídricos superficiales y subterráneos disponibles, así como para desarrollar modelos hidrológicos (Maldonado-de León *et al.*, 2001; Torres-Benites *et al.*, 2005; Paz-Pellat, 2009). Las corrientes efímeras, que fluyen sólo en temporada de lluvias, son los ambientes fluviales predominantes en las zonas áridas y semiáridas (Shaw y Cooper, 2008). Los mecanismos de generación de flujos de corrientes en

\*Author for correspondence ❖ Autor responsable.

Received: August, 2010. Approved: February, 2011.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 45: 157-164. 2011.

fluvial environments in arid and semiarid zones (Shaw and Cooper, 2008). Mechanisms of streamflow generation in ephemeral streams are dominated by throughflow, overland flow, and perched zones of saturated soil and regolith water (Rassam *et al.*, 2006).

Hydrograph separation is used in order to understand hydrological processes both in humid and temperate basins as well as in semiarid areas (Bohté *et al.*, 2010). This process is often carried out by considering a storm hydrograph as consisting of two components; baseflow, which represents the part of the discharge which enters into a stream mainly from groundwater, and direct runoff. In a natural watershed, streamflow is sustained after a precipitation event because of drainage from a number of different types of water storages usually located both above and below ground level (Griffiths and Clausen, 1997). In humid and temperate watersheds, groundwater discharge from the shallow unconfined aquifer is commonly assumed to be the main contributor to baseflow (Wittenberg and Sivapalan, 1999). However, groundwater contribution is rarely present in small upland catchments (Hewlett and Hibbert, 1963) as well as in arid zones (Rassam *et al.*, 2006) where the components of the hydrograph are considered to be subsurface flow (proportion of precipitation which has not passed down to the water table) and direct runoff. The main objective of this study was to modeling the recession of observed hydrographs of a small semiarid watershed in order to obtain a better insight about the runoff components and the recession process of this watershed.

## MATERIALS AND METHODS

### Theory

Tallaksen (1995) points out that hydrological research has focused mostly on the baseflow recession for which the exponential function seen in equation 1 is widely used to describe its behavior:

$$Q_t = Q_0 \exp(-\alpha t) \quad (1)$$

where  $Q_t$  is the discharge at time  $t$ ,  $Q_0$  the initial discharge, and  $\alpha$  a recession constant expressed in inverse time. When the assumption that the recession curve of the hydrograph is the result of more than a single reservoir is made, it could

corrientes efímeras están dominados por el flujo subsuperficial y el superficial, y las zonas de suelo saturado y regolito sobre estratos impermeables cercanos a la superficie (Rassam *et al.*, 2006).

La separación de hidrogramas se usa para entender los procesos hidrológicos tanto en cuencas húmedas como templadas, y zonas semiáridas (Bohté *et al.*, 2010). Este proceso suele realizarse considerando que el hidrograma de una tormenta consta de dos componentes: flujo base, que representa la parte del escurrimiento que entra en la corriente principalmente de las aguas subterráneas y escurrimiento directo. En una cuenca natural, el flujo en las corrientes se mantiene después de un evento de precipitación debido al drenaje de diversos almacenamiento de agua ubicados generalmente encima y debajo del nivel del suelo (Griffiths y Clausen, 1997). En cuencas húmedas y templadas se considera que la descarga de los acuíferos no confinados es la principal contribución al flujo base (Wittenberg y Sivapalan, 1999). Sin embargo, la presencia de aguas subterráneas es poco frecuente en cuencas pequeñas de zonas altas (Hewlett y Hibbert, 1963), y en zonas áridas (Rassam *et al.*, 2006), donde se considera que los componentes del hidrograma son el flujo subsuperficial (proporción de precipitación que se infiltra sin llegar al nivel freático) y el escurrimiento directo. El objetivo principal de este estudio fue modelar la recesión de los hidrogramas observados en una cuenca semiárida pequeña para una mejor comprensión de los componentes del escurrimiento y el proceso de recesión de esta cuenca.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Teoría

Tallaksen (1995) señala que la investigación hidrológica se ha centrado principalmente en la recesión del flujo base, para lo cual la función exponencial en la ecuación 1 se usa ampliamente para describir su comportamiento:

$$Q_t = Q_0 \exp(-\alpha t) \quad (1)$$

donde,  $Q_t$  es el gasto en el tiempo  $t$ ,  $Q_0$  el gasto inicial y  $\alpha$  una constante de recesión expresada como el inverso del tiempo. Cuando se asume que la curva de recesión del hidrograma

be conceptually modeled as the sum of  $n$  linear reservoirs. For example, in the case of two linear reservoirs as (Moore, 1997):

$$Q = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t} \tag{2}$$

where the subindex 1 and 2 make reference to the first and the second reservoir.

**Data**

Measurements of streamflow were made at the small watershed known as La Barreta which is part of Santa Catarina basin (Germán and Domínguez, 2000) in the state of Querétaro, México located at 20° 30' and 20° 54' N, and 100° 17' and 100° 36' W. The watershed has an area of 4.32 km<sup>2</sup> and its altitude is between 2100 and 2600 m. The time of concentration (Tc) according to the U.S. Corps of Engineers formulae (Campos-Aranda, 2010) for this watershed is around 42 min. Streamflow measurements were made at the outlet of the watershed during two runoff seasons (2005-2006) with a V-shape weir equipped with a water-level sensor. During the period of observation, 17 runoff events were recorded with a time resolution of 10 min each. A summary of the observed runoff events is shown in Table 1 and examples of the hydrograph recorded are presented in Figure 1.

**Methods**

The first stage of this research consisted in the analysis of the semi-logarithmic graph of the recession curves in order to

es el resultado de más de un reservorio, se puede modelar conceptualmente como la suma de  $n$  reservorios lineales. Por ejemplo, en el caso de dos reservorios lineales (Moore, 1997):

$$Q = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t} \tag{2}$$

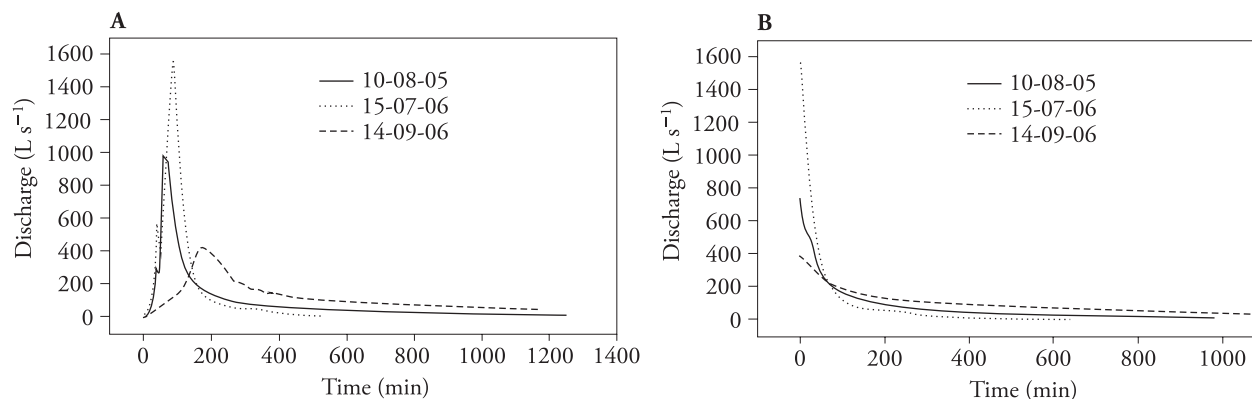
donde los subíndices 1 y 2 se refieren al primer y segundo reservorio.

**Datos**

Las mediciones de flujos de corriente se realizaron en una cuenca pequeña conocida como La Barreta, que es parte de la cuenca Santa Catarina (Germán y Domínguez, 2000) en el estado de Querétaro, México, ubicada a 20° 30' y 20° 54' N y 100° 17' y 100° 36' O. La cuenca tiene una superficie de 4.32 km<sup>2</sup> y está entre 2100 y 2600 m de altitud. El tiempo de concentración (Tc) de esta cuenca, de acuerdo con la fórmula del Cuerpo de Ingenieros de EE.UU. (Campos-Aranda, 2010), es alrededor de 42 min. Las mediciones de los flujos de corrientes se hicieron a la salida de la cuenca durante dos temporadas (2005-2006) con un vertedor triangular equipado con un sensor de nivel del agua. Durante el período de observación se registraron 17 eventos de escurrimiento con una resolución de 10 min cada uno. En el Cuadro 1 se presenta un resumen de los eventos de escurrimiento observados, y en la Figura 1 ejemplos de los hidrogramas registrados.

**Table 1. Runoff characteristics in La Barreta watershed.**  
**Cuadro 1. Características de escurrimiento en la cuenca La Barreta.**

Event	Date	Total runoff (m <sup>3</sup> )	Peak discharge (L s <sup>-1</sup> )	Time to peak (h)
1	July 18, 2005	1848.20	311.27	0.6
2	July 19, 2005	2261.03	259.53	0.5
3	July 27, 2005	122.27	6.69	2.8
4	August 8, 2005	338.12	65.42	0.5
5	August 10, 2005	6256.50	981.29	1.0
6	August 11, 2005	3020.23	118.44	1.5
7	August 12, 2005	11616.01	1330.78	0.5
8	August 26, 2005	200.49	108.51	0.5
9	August 31, 2005	157.05	12.76	3.0
10	July 15, 2006	7001.86	1555.29	1.5
11	July 31, 2006	218.97	33.29	0.6
12	August 2, 2006	146.48	14.96	0.5
13	September 12, 2006	354.27	12.19	2.0
14	September 13, 2006	1069.60	67.98	1.5
15	September 14, 2006	8678.59	424.22	2.5
16	September 20, 2006	202.00	7.91	1.5
17	September 29, 2006	1426.36	83.53	1.0



**Figure 1. Example of: A) observed hydrograph, and B) recession curves used to fit the models.**

**Figura 1. Ejemplo de: A) hidrograma observado, y B) curvas de recesión usadas para ajustar los modelos.**

identify the linearity of those curves. Afterward, the data of recession curves were used to fit a model according to equations 1 and 2. In this investigation, in order to establish a conceptual relationship between the direct runoff and subsurface flow, and the components of the models, equation 2 was favored. The fitting process was carried out through an iterative nonlinear curve fitting procedure based on nonlinear least squares using the Levenberg-Marquardt algorithm (Moré, 1978). In order to test the goodness of fit of the equations the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the root mean square error (RMSE) were calculated. Finally, assuming that each reservoir identified within the fitting process could represent a runoff component conceptually, the 17 hydrographs recorded were separated into subsurface flow and direct runoff in order to determine the volume coming from each runoff component for comparison purposes, it under the assumption that there was not baseflow.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Graphical interpretation of the hydrograph recession

The results of the graphical analysis indicate that only 3 of the 17 hydrograph recession analyzed (events 3, 9 and 17 in Table 2) could be considered as linear reservoirs which suggest that this watershed behaves mainly like a multi-reservoir system; in other words, the recession in this watershed corresponds to a nonlinear process. Therefore, the modeling of the recessions of these hydrographs could be done in a more effective way by using equation 2. The aforementioned results are product of the complex interactions of different runoff sources which include overland flow and interflow; this kind of behavior

## Métodos

La primera etapa de esta investigación consistió en el análisis de la gráfica semilogarítmica de las curvas de recesión para determinar la linealidad de las mismas. Después, los datos de las curvas de recesión se usaron para ajustar un modelo de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2. En este estudio, para establecer una relación conceptual entre el escurrimiento directo y el flujo subsuperficial, y los componentes de los modelos, se favoreció la ecuación 2. El ajuste se efectuó a través de un procedimiento iterativo no lineal basado en mínimos cuadrados mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt (Moré, 1978). Para probar la bondad de ajuste de las ecuaciones, se calculó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Por último, asumiendo que cada reservorio identificado en el proceso de ajuste podría representar conceptualmente un componente del escurrimiento, los 17 hidrogramas registrados fueron separados en flujo subsuperficial y escurrimiento directo para determinar el volumen procedente de cada componente del escurrimiento con fines de comparación, bajo el supuesto de que no había flujo base.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Interpretación gráfica de la recesión del hidrograma

Los resultados del análisis gráfico indican que sólo 3 de los 17 hidrogramas de recesión analizados (eventos 3, 9 y 17 en el Cuadro 2) se podrían considerar como reservorios lineales, lo que sugiere que esta cuenca se comporta principalmente como un sistema de varios reservorios; es decir, la recesión

**Table 2. Main parameters characterizing the hydrograph recession.**  
**Cuadro 2. Principales parámetros que caracterizan la recesión del hidrograma.**

Event	$Q_1$ (L s <sup>-1</sup> )	$\alpha_1$ (h <sup>-1</sup> )	$Q_2$ (L s <sup>-1</sup> )	$\alpha_2$ (h <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE (L s <sup>-1</sup> )
1	145.000	-1.7750	71.950	-0.43470	1.000	0.60
2	91.600	-0.4770	24.700	-0.09797	0.998	1.46
3	6.075	-0.2606	---	---	0.982	0.20
4	30.660	-1.5240	18.460	-0.40160	0.999	0.39
5	569.200	-1.6850	164.200	-0.17400	0.997	6.58
6	25.830	-0.9783	79.130	-0.11830	0.998	0.89
7	283.100	-0.9336	220.800	-0.10220	0.999	3.38
8	66.070	-9.2750	53.420	-1.54300	0.998	1.01
9	10.990	-0.5868	---	---	0.999	0.09
10	1483.000	-2.1600	133.000	-0.31050	0.998	12.15
11	25.110	-1.0240	8.470	-0.36320	0.999	0.26
12	9.628	-0.7822	5.040	-0.22580	0.999	0.11
13	3.644	-0.9856	7.905	-0.05462	0.994	0.14
14	38.500	-1.0970	28.660	-0.14500	0.999	0.48
15	231.100	-0.9208	166.500	-0.08439	0.990	2.30
16	2.082	-1.9650	5.112	-0.10550	0.997	0.07
17	24.370	-0.1755	---	---	0.984	0.66

R<sup>2</sup>: coefficient of determination; RMSE: root mean square error ❖ R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; RMSE: raíz del error cuadrático medio.

has already been recognized for semiarid watersheds (Peters and Havstad, 2006).

**Equations fitting**

Equations were fitted for all the recessions listed above, obtaining 14 fittings with equation 2 and 3 with equation 1. Details of the fitted equations are shown in Table 2 where sub-index 1 refers to the first reservoir and sub-index 2 to the second reservoir. In the same Table  $\alpha$  values for each reservoir are presented. These values were used to obtain the mean residence time as  $1/\alpha$ . It was noted that for the first reservoir the mean time of residence varied between 0.1 y 5.7 h, while in the second reservoir the variation of  $1/\alpha$  was between 0.65 and 18.5 h. The average of the mean time of residence was 1.1 h for the first reservoir and 4.0 h for the second. The mean residence times obtained show a very rapid response of the watershed which is characteristic of hillslopes and watersheds with steep slopes (Weiler and McDonnell, 2004).

**Direct runoff and subsurface flow volumes**

In Table 3 it is shown a comparison between the direct runoff and subsurface flow drained volumes

en esta cuenca corresponde a un proceso no lineal. Por tanto, el modelado de las curvas de recesión de estos hidrogramas se podría hacer más eficazmente usando la ecuación 2. Los resultados anteriores son producto de las complejas interacciones entre las diferentes fuentes de escurrimiento, que incluyen flujo superficial y subsuperficial; este tipo de comportamiento se ha identificado en cuencas semiáridas (Peters y Havstad, 2006).

**Ajuste de ecuaciones**

Las ecuaciones se ajustaron para todas las curvas de recesión ya mencionadas, obteniendo 14 ajustes con la ecuación 2 y 3 con la 1. Los detalles de las ecuaciones ajustadas se muestran en el Cuadro 2, donde el subíndice 1 se refiere al primer reservorio y el subíndice 2 al segundo. En el mismo Cuadro se presentan los valores de  $\alpha$  para cada reservorio. Estos valores se usaron para obtener el tiempo medio de residencia como  $1/\alpha$ . Se observó que para el primer reservorio el tiempo de residencia medio varió entre 0.1 y 5.7 h, mientras que en el segundo reservorio la variación de  $1/\alpha$  fue 0.65 a 18.5 h. El promedio del tiempo de residencia medio fue 1.1 h para el primer reservorio y 4.0 h para el segundo. Los tiempos promedios de residencia obtenidos

**Table 3. Direct runoff and subsurface flow volumes comparison.**  
**Cuadro 3. Comparación entre escurrimiento directo y volúmenes de flujo subsuperficial.**

Event	Total runoff (m <sup>3</sup> )	Direct runoff (m <sup>3</sup> )	Subsurface flow (m <sup>3</sup> )	Direct runoff rate (%)	Subsurface flow index (%)
1	1848.20	1500.40	347.8	81.2	18.8
2	2261.03	1990.80	270.23	88.0	12.0
3	122.27	53.10	69.17	43.4	56.6
4	338.12	243.95	94.17	72.1	27.9
5	6256.50	3575.74	2680.76	57.2	42.8
6	3020.23	1314.07	1706.16	43.5	56.5
7	11616.01	5483.04	6132.97	47.2	52.8
8	200.49	98.59	101.9	49.2	50.8
9	157.05	157.05	0	100.0	0
10	7001.86	5663.29	1338.57	80.9	19.1
11	218.97	185.33	33.64	84.6	15.4
12	146.48	105.69	40.79	72.2	27.8
13	354.27	67.31	286.96	19.0	81.0
14	1069.60	452.46	617.14	42.3	57.7
15	8678.59	3884.36	4794.23	44.8	55.2
16	202.00	40.38	161.62	20.0	80.0
17	1426.36	1426.36	0	100.0	0

for the 17 hydrographs. Subsurface flow index ranged from 0 for events number 9 and 17, to 81 % for event 13 with a mean value of 38.5 %. Direct runoff oscillated between 19 and 100 %, for events number 9 and 17 of the total runoff recorded (Table 3). Mean values show that approximately 61.5 % of the runoff is due to a rapid response and the 38.5 % occurs more slowly. These results show that most of the total water flowing at the watershed outlet comes from direct runoff although it is noteworthy that the subsurface flow is a very important component of the drainage.

In Table 4 a comparison between the main statistics of the runoff components is presented for the two runoff seasons monitored in the study area; no significant differences were found between the statistics. However, the coefficient of variation shows that during 2006 the runoff behavior was more heterogeneous.

## CONCLUSIONS

In this study, 17 hydrographs recorded in a small semiarid watershed in the state of Querétaro, México were used to analyze its recession curves. The results showed that for this watershed the hydrograph recession was in general non-linear and can be well represented with a model of two linear reservoirs. Obtained mean residence times for each of the runoff components showed clear differences between them.

muestran una respuesta muy rápida de la cuenca, lo que es característico de laderas y cuencas hidrográficas con pendientes pronunciadas (Weiler y McDonnell, 2004).

### Escurrimiento directo y volúmenes de flujo subsuperficial

En el Cuadro 3 se muestra una comparación entre el escurrimiento directo y los volúmenes de flujo subsuperficial drenados por los 17 hidrografías. El índice del flujo subsuperficial osciló entre 0 para los eventos número 9 y 17, y 81 % para el evento 13, con un valor medio de 38.5 %. El escurrimiento directo osciló de 19 a 100 % de escurrimiento total registrado para los eventos número 9 y 17 (Cuadro 3). Los valores promedio muestran que aproximadamente 61.5 % del escurrimiento se debe a una respuesta rápida y el 38.5 % se produce más lentamente. Estos resultados muestran que la mayoría del flujo en la salida de la cuenca proviene de escurrimiento directo, aunque cabe destacar que el flujo subsuperficial es un componente muy importante del drenaje.

En el Cuadro 4 se presenta una comparación entre los principales estadísticos de los componentes del escurrimiento para las dos estaciones de escurrimiento monitoreadas en el área de estudio; no hubo diferencias significativas entre los esta-

**Table 4. Statistical analysis of runoff components of La Barreta watershed.**  
**Cuadro 4. Análisis estadístico de los componentes del escurrimiento en la cuenca La Barreta.**

Statistic	Runoff (m <sup>3</sup> )	Direct runoff (m <sup>3</sup> )	Subsurface flow (m <sup>3</sup> )	Runoff (m <sup>3</sup> )	Direct runoff (m <sup>3</sup> )	Subsurface flow (m <sup>3</sup> )
	Runoff season 2005			Runoff season 2006		
Total	25819.9	14416.7	11403.2	19098.1	11825.2	7273.0
Minimum	122.3	53.1	0.0	146.5	40.4	0.0
Maximum	11616.0	5483.0	6133.0	8678.6	5663.3	4794.2
Mean	2868.9	1601.9	1267.0	2387.3	1478.1	909.1
Std. deviation	3838.1	1863.9	2045.8	3426.1	2137.2	1632.6
CV	1.3	1.2	1.6	1.4	1.4	1.8
n	9	9	9	8	8	8

CV: variation coefficient; n: number of hydrographs ❖ CV: coeficiente de variación; n: número de hidrogramas.

In the case of direct runoff, an oscillation of between 0.1 and 6 hours was noted, while the subsurface flow, it ranged between 0.65 and 18.5 hours. The variability in this parameter could be attributed to differences in the pre-event soil moisture content and the magnitude of the rainfall generating runoff. Finally, from the hydrograph separation it could be concluded that in this watershed subsurface flow represents an important amount of the runoff hydrograph which can contribute with a small portion of the following hydrographs, especially in the case of runoff events which are separated by few hours or less than a day.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The first author acknowledges the financial support provided by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) for his doctorate studies at the Universidad Autónoma de Querétaro. The authors would also like to acknowledge Silvia C. Stroet of the Engineering Faculty for editing the English in this document.

#### LITERATURE CITED

- Bohté, R., M. L. Mul, T. A. Bogaard, H. H. G. Savenije, S. Uhlenbrook, and T. C. Kessler. 2010. Hydrograph separation and scale dependency of natural tracers in a semi-arid catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sc* 7: 1343-1372.
- Campos-Aranda, D. F. 2010. Introducción a la hidrología urbana. Daniel Francisco Campos Aranda, San Luis Potosí, Mexico, pp: 83-89.
- Germán, U. R., y M. A. Domínguez C. 2000. Geología y Geomorfología. *In*: Pineda L. R., y L. Hernández S. (eds). La Microcuenca Santa Catarina Querétaro: Estudios para su Conservación y Manejo. Universidad Autónoma de Querétaro, México. pp: 31-38.

dísticos. Sin embargo, el coeficiente de variación muestra que durante 2006 el escurrimiento fue más heterogéneo.

#### CONCLUSIONES

En este estudio se usaron 17 hidrogramas registrados en una cuenca semiárida pequeña del estado de Querétaro, México, para analizar sus curvas de recesión. Los resultados revelaron que para esta cuenca la recesión del hidrograma fue, en general, no lineal y se puede representar bien con un modelo de dos reservorios lineales. Los tiempos de residencia promedio de cada uno de los componentes del escurrimiento mostraron claras diferencias entre ellos. En el caso del escurrimiento directo hubo una oscilación entre 0.1 y 6 horas, mientras que el flujo subsuperficial varió de 0.65 a 18.5 horas. La variabilidad en este parámetro podría atribuirse a diferencias en el contenido de humedad del suelo antes del evento y a la magnitud de la precipitación que generan escurrimientos. Por último, a partir de la separación del hidrograma se podría concluir que el flujo subsuperficial en la cuenca representa una cantidad importante del hidrograma de escurrimiento, lo que puede tener una contribución pequeña en los siguientes hidrogramas, especialmente en el caso de los eventos de escurrimiento que están separados por unas pocas horas o menos de un día.

—Fin de la versión en Español—



- Griffits, G. A., and B. Clausen. 1997. Streamflow recession in watersheds with multiple water storages. *J. Hydrol.* 190: 60-74.
- Hewlett, J. D., and A. R. Hibbert. 1963. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. *J. Geophys. Res.* 68: 1081-1087.
- Maldonado-de-León O. A., O. L. Palacios-Velez, J. L. Oropeza-Mota, R. Springall-Galindo, y D. S. Fernández-Reynoso. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo de la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345.
- Moore, R. D. 1997. Storage-outflow modeling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment. *J. Hydrol.* 198: 260-270.
- Moré, J. J. 1978. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. *Lecture Notes in Mathematics* 630: 105-116.
- Paz-Pellat F. 2009. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia* 43: 521-528.
- Peters, D. P. C., and K. M. Havstad. 2006. Nonlinear dynamics in arid and semi-arid systems: Interactions among drivers and processes across scales. *J. Arid Environ.* 65: 196-206.
- Rassam, D. W., C. S. Fellows, R. De Hayr, H. Hunter, and P. Bloesch. 2006. The hydrology of riparian buffer zones; two case studies in an ephemeral and a perennial stream. *J. Hydrol.* 325: 308-324.
- Shaw, R. J., and D. J. Cooper. 2008. Linkages among watersheds, stream reaches, and riparian vegetation in dryland ephemeral stream networks. *J. Hydrol.* 350: 68-82.
- Tallaksen, M. L. 1995. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.* 165: 349-370.
- Torres-Benites E., E. Mejía-Sáenz, J. Cortés-Becerra, E. Palacios-Vélez, y A. Exebio-García. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* 39: 481-490.
- Weiler, M., and J. McDonnell. 2004. Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology. *J. Hydrol.* 285: 3-18.
- Wittenberg, H., and M. Sivapalan. 1999. Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *J. Hydrol.* 219: 20-33.