

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA EMPÍRICA DEL GASTO DE 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO DEL RÍO GRANDE, TLALCHAPA, GUERRERO EN DOS ESCENARIOS DE USO DEL SUELO

## EMPIRICAL-BASED HYDROLOGIC MODELING OF THE 100-YEAR RETURN PERIOD OF OVERLAND FLOW IN THE RIO GRANDE WATERSHED, TLALCHAPA, GUERRERO, USING TWO LAND USE SCENARIOS

Liliana Miranda-Aragón<sup>1\*</sup>, L. Alicia Ibáñez-Castillo<sup>2</sup>, J. René Valdez-Lazalde<sup>1</sup>, Patricia Hernández-de la Rosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (aragonl@colpos.mx), (valdez@colpos.mx) (pathr@colpos.mx). <sup>2</sup>Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (libanez@correo.chapingo.mx)

### RESUMEN

Este trabajo surge como una necesidad de investigación sobre la dinámica de uso del suelo en la cuenca, con el fin de confirmar un aumento en el gasto máximo a través del tiempo, debido al recurrente derrumbe del puente principal, que comunica a la localidad de Villa Madero con su cabecera municipal Tlalchapa, Guerrero, ocasionado por precipitaciones históricas no registradas. La metodología consistió en obtener inicialmente los usos del suelo mediante la técnica de clasificación supervisada en una imagen de satélite Landsat de 1973 y mediante la digitalización en monitor sobre una imagen de muy alta resolución espacial QuickBird del año 2006. El modelo hidrológico empírico del proceso lluvia-escurrimiento de la cuenca fue realizado con el sistema HEC-HMS para los escenarios 1973 y 2006. Los principales parámetros empleados en el modelo fueron: 1) La tormenta sintética tipo II; 2) el número N ponderado por subcuenca, creados por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS). Con el modelo fue calculado el hidrograma a la salida de la cuenca. Aunque cambió las coberturas (arboladas a pastizal), no hubo diferencias en el número N (51.55 en 1973 y 57.87 en 2006) y el gasto máximo calculado para los dos escenarios ( $431 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en 1973 y  $484 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en 2006).

**Palabras clave:** Cambio de uso del suelo, HEC-HMS, número N.

### INTRODUCCIÓN

Los cambios en el uso del suelo tienen consecuencias preocupantes, ya que cuando se agregan globalmente influyen aspectos clave en el funcionamiento del sistema terrestre, con un efecto directo en la biodiversidad, en el cambio climático local y regional, en la degradación del suelo, y en los procesos hidrológicos de los ecosistemas; además

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Febrero, 2008. Aprobado: Noviembre, 2008.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 333-344. 2009.

### ABSTRACT

This study addresses the need for research in the dynamics of land use in the watershed with the aim of confirming an increase in the maximum discharge over time because of the recurring destruction of the main bridge that communicates the town of Villa Madero with its municipal seat, Tlalchapa, Guerrero, caused by unrecorded historical rainfall. The methodology consisted, initially, of determining land use with the supervised classification technique in a 1973 Landsat satellite image, and by screen digitizing over a very high spatial resolution 2006 QuickBird image. The empirical hydrologic model of the rainfall-runoff process in the watershed was constructed with the HEC-HMS system for the 1973 and 2006 scenarios. The principal parameters used in the model were: 1) Type II synthetic storm; 2) the weighted N by sub-basin, created by the US Soil Conservation Service (SCS). With the model we calculated the discharge hydrograph for the watershed. Although a change in cover was detected (forested to grassland) there were no differences in the number (51.55 in 1973 and 57.87 in 2006) or in the maximum calculated discharge for the two scenarios ( $431 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in 1973 and  $484 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in 2006).

**Key words:** land use change, HEC-HMS, runoff curve number.

### INTRODUCTION

Changes in land use have serious consequences since, when they are aggregated globally, they affect key aspects in the functioning of the terrestrial system, directly influencing biodiversity, local and regional climate change, soil degradation, and hydrological processes of the ecosystems. In addition, they decrease the biological systems' capacity to sustain human needs (Lambin *et al.*, 2001). The water-forest relationship has been documented in terms of the effects of cover and land use on runoff (Andréassian, 2004).

disminuyen la habilidad de los sistemas biológicos para soportar las necesidades humanas (Lambin *et al.*, 2001). La relación agua-bosque está documentada respecto a los efectos de la cobertura y uso del suelo en el escurrimiento (Andréassian, 2004).

En la cuenca de estudio han ocurrido cambios en el uso del suelo con tendencia a la degradación de los recursos naturales en los últimos 30 años, trayendo un efecto en el gasto pico causado por eventos históricos de precipitación. Para verificar tal hipótesis los siguientes objetivos fueron planteados: 1) Analizar la dinámica de cambio durante el periodo 1973-2006 mediante la comparación de mapas temáticos generados con imágenes de satélite; 2) modelar empíricamente el proceso lluvia-escurrimiento para los escenarios de uso del suelo 1973-2006; 3) comparar medias del número N y el tiempo de retraso para las fechas de uso del suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La cuenca está ubicada al este de la cabecera municipal de Tlalchapa, Guerrero, a 18° 22' 27" y 18° 32' 25" N, y 100° 27' 40" y 100° 21' 27" O, con una superficie de 115.67 km<sup>2</sup>, tiempo de concentración de 102 min, pendiente media del cauce principal de 4.27 %, pendiente media de la cuenca de 30.37 %, y sin datos de aforo. Está en la parte central de la región hidrológica 18 del río Balsas, en la subregión 18C: Balsas-Zirándaro, colindando con los estados de México y Michoacán (Perevochtchikova y García, 2006) (Figura 1).

### Cartografía y pluviometría

Para obtener los mapas de vegetación y uso del suelo fueron usadas dos imágenes de satélite: Landsat MSS 1973 y QuickBird 2006; la primera del Arizona Regional Image Archive (ARIA) <http://aria.arizona.edu/><sup>3</sup> y la segunda de <http://earth.google.es/><sup>4</sup>. Ambas imágenes fueron georreferenciadas al sistema de coordenadas UTM-14n, con datum WGS84. Dado que la metodología para detectar cambios en este estudio fue post-clasificación, no fue necesario estandarizar radiométricamente las imágenes.

Para la modelación hidrológica la siguiente información fue usada: 1) Curvas de nivel en formato vectorial (20 m); 2) la carta edafológica a escala 1:50,000 (E14A65 de Ciudad Altamirano y E14A75 de Palmar Chico) (INEGI, 1999); 3) los registros de la precipitación máxima diaria del sistema ERIC III (IMTA, 2006).

### Dinámica de uso del suelo

Para generar los mapas de cobertura fue usada la imagen multiespectral del satélite Landsat MSS 1973 clasificada mediante

In the watershed studied, land use changes have occurred during the last 30 years, with a tendency to degrade natural resources. This has led to an effect on peak discharges caused by historical rainfall events. To verify this hypothesis, the following objectives were established: 1) To analyze the dynamics of change during the period 1973-2006 by comparing thematic maps generated with satellite images; 2) to empirically model the process of rainfall-runoff for the land use scenarios 1973-2006; 3) to compare the means of N number and lag time for the land use dates.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The watershed is located east of the municipal seat of Tlalchapa, Guerrero, at 18° 22' 27" and 18° 32' 25" N and 100° 27' 40" and 100° 21' 27" W, with an area of 115.67 km<sup>2</sup>. Its hydrological characteristics are: Concentration time 102 min, mean slope of the main river channel 4.27 %, mean slope of the watershed 30.37 %, and no gauge data. It is in the central part of hydrologic region 18 of the Balsas River in the sub-region 18C: Balsas-Zirándaro, bordering the states of México and Michoacán (Perevochtchikova and García, 2006) (Figure 1).

### Cartography and pluviometry

To obtain the vegetation and land use maps, two satellite images were used: Landsat MSS 1973 and QuickBird 2006. The former was from the Arizona Regional Image Archive (ARIA) <http://aria.arizona.edu/><sup>3</sup> and the latter from <http://earth.google.es/><sup>4</sup>. Both images were georeferenced to the UTM-14n system and the WGS84 datum. Given that the methodology for detecting changes in this study was post-classification, it was not necessary to standardize the images radiometrically.

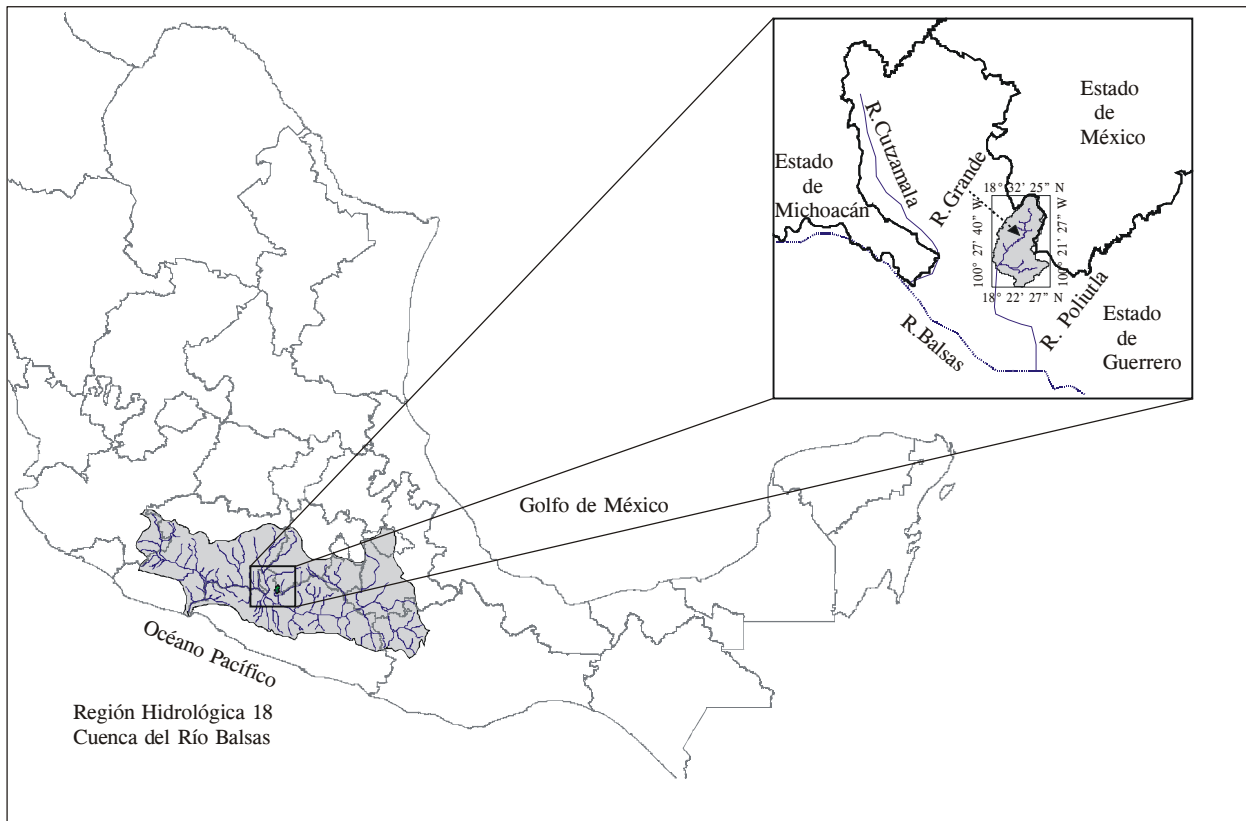
For hydrological modeling, the following information was used: 1) Contour lines in vector format (20 m); 2) soil map at a scale of 1:50 000 (E14A65 city of Altamirano and E14A75 Palmar Chico) (INEGI, 1999); 3) the records of maximum daily rainfall from the ERIC III system (IMTA, 2006).

### Land use dynamics

To generate maps of plant cover, the Landsat MSS 1973 multi-spectral satellite image was used and classified using ERDAS Imagine 8.7 software with the maximum likelihood procedure (Leyca Geosystems, 2003). Previous to this, field explorations of the watershed were conducted to facilitate the selection of training areas for each land use: 1) Oak forest (BQ); 2) oak forest with secondary vegetation (BQVS); 3) tropical deciduous forest (SBC); 4) tropical deciduous forest with secondary vegetation (SBCVS); 5) grassland

<sup>3</sup> Consultada: 15-octubre-2006.

<sup>4</sup> Consultada: 22-enero-2007.



**Figura 1. Ubicación geográfica.**  
**Figure 1. Geographic location.**

el software ERDAS Imagine 8.7 con el procedimiento de máxima verosimilitud (Leyca Geosystems, 2003). Previamente se hicieron recorridos de campo en la cuenca para facilitar la creación de áreas de entrenamiento para cada uso del suelo: 1) Bosque de encino (BQ); 2) bosque de encino con vegetación secundaria (BQVS); 3) selva baja caducifolia (SBC); 4) selva baja caducifolia con vegetación secundaria (SBCVS); 5) pastizal (PZ); 6) agricultura de temporal (AT). La vegetación y uso del suelo 2007 fue obtenida mediante fotointerpretación de la imagen QuickBird 2006 dada su resolución espacial mejorada de 2.5 m.

Para el análisis de cambio de uso del suelo fue calculada la tasa de cambio, la matriz de cambio y la tasa de deforestación con la fórmula propuesta por Palacio *et al.* (2004):

$$Td = \left[ \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] \cdot 100 \quad (1)$$

donde,  $Td$  = tasa de deforestación anual en porcentaje;  $S_2$  = área arbolada en el año final;  $S_1$  = área arbolada en el año inicial;  $n$  = número de años del periodo de análisis.

(PZ); 6) rainfed agriculture (AT). Vegetation and land use for 2007 was determined by photointerpretation of the 2006 QuickBird image given its improved spatial resolution of 2.5 m.

For the analysis of land use change, we calculated the change rate, the change matrix and the rate of deforestation with the formula proposed by Palacio *et al.* (2004):

$$Td = \left[ \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] \cdot 100 \quad (1)$$

where  $Td$  = annual rate of deforestation in percentage;  $S_2$  = forested area in the end year;  $S_1$  = forested area in the initial year;  $n$  = number of years of the period of analysis.

### Hydrologic modeling

#### Maximum precipitation selected and design storm

The weather stations near the watershed area were determined using maximum daily precipitation (mm) of the years recorded in the ERIC III system (IMTA, 2006). An analysis of rainfall frequency was conducted on the basis of probabilistic distribution models:

**Modelación hidrológica**

**Lámina máxima de precipitación y tormenta diseño**

Las estaciones pluviométricas cercanas al área de la cuenca fueron determinadas usando la precipitación diaria máxima (mm) de los años registrados en el sistema ERIC III (IMTA, 2006). Un análisis de frecuencia de las precipitaciones fue realizado con base en modelos de distribuciones probabilísticas: Log-normal, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III (LPIII), General de Valores Extremos (GVE) y Tipo Exponencial de Raíz Cuadrada (TERC) (Rao y Hamed, 2000; Zorraquino, 2004; Campos, 2008). La selección de los modelos de distribución más adecuados fue realizada con base en el valor mínimo del Error Estándar de Ajuste (EEA) de la estimación (Kite, 1977). Los cuantiles fueron estimados con un periodo de retorno de 100 años (Cuadro 1). La precipitación máxima calculada fue asignada a las 16 subcuencas (delimitadas de manera automáticamente por el sistema HEC-GEOHMS) mediante polígonos de Thiessen, obteniendo la precipitación para cada subcuenca y ponderando el área de influencia de las estaciones pluviométricas (Melesse *et al.*, 2003). Para distribuir temporalmente la precipitación máxima fue seleccionada la tormenta de diseño tipo II del SCS (la cuenca no presenta influencia ciclónica) en intervalos de 15 min (hietograma), y definida mediante factores de multiplicación acumulados en decimal donde el valor máximo es 1.

**Hidrograma unitario sintético**

Un hidrograma es una representación gráfica del gasto ( $m^3 s^{-1}$ ) a través del tiempo, el cual puede ser la respuesta al tiempo de duración de una tormenta en una cuenca. El hidrograma unitario sintético es un modelo idealizado que representa el flujo de una corriente ocasionado por una tormenta unitaria ( $m^3 s^{-1} mm^{-1}$ ). Para determinar el hidrograma de diferentes tamaños de tormenta simplemente se realiza la convolución del hidrograma unitario sintético en cantidad y tiempo, conociendo su gasto pico y el tiempo de retraso de la cuenca.

**Gasto pico y tiempo de retraso**

A inicios de 1950, el Departamento de Agricultura de los EE.UU. desarrolló un método de la curva de escurrimiento para calcular el volumen del escurrimiento directo proveniente de la precipitación. El análisis de registros para eventos de tormenta y escurrimiento indican que antes de que exista escurrimiento primero se deben

Log-normal, Pearson type III, Log-Pearson type III (LPIII), General Extreme Values (GEV) and Square Root Exponential Type (SRET) (Rao and Hamed, 2000; Zorraquino, 2004; Campos, 2008). The most adequate distribution models were selected based on the minimum value of the Fit Standard Error (FSE) of the estimation (Kite, 1977). Quantiles were then estimated with a return period of 100 years (Table 1). Maximum calculated precipitation was assigned to the 16 sub-basins (delimited automatically by the HEC-GEOHMS system), obtaining the precipitation value for each sub-basin and weighting the area of influence of the weather stations (Thiessen polygons) (Melesse *et al.*, 2003). To distribute maximum precipitation over time, type II design storm of SCS (the watershed does not have influence of hurricanes) was selected in intervals of 15 min (hietograph) and defined through accumulated factors of multiplication in decimals where the maximum value is 1.

**Synthetic unit hydrograph**

A hydrograph is a graphic representation of discharge ( $m^3s^{-1}$ ) over time. It can be the response to the duration time of a storm in a watershed. The synthetic unit hydrograph is an idealized model that represents the streamflow caused by a single storm ( $m^3s^{-1} mm^{-1}$ ). To determine the hydrograph for different storm magnitudes, the synthetic unit hydrograph is simply convoluted in quantity and time, when peak discharge and basin lag time are known.

**Peak discharge and lag time**

During the 1950s the US Department of Agriculture developed a method of runoff curve to calculate the volume of direct runoff from precipitation. The analysis of records for storm events and runoff indicate that before runoff occurs, volumes of interception, storage in depressions, and infiltration, which are the initial abstraction, must be satisfied. Empirical analyses suggest that the N number is in function of four factors: Group and land use, hydrologic condition (% plant cover) and antecedent moisture conditions. The following formula is used to calculate the mean runoff of a storm (Aparicio, 2005):

$$Pe = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \text{ Para } (P > 0.2S) \text{ de otra manera } Q=0 \quad (2)$$

where  $Pe$ =overland flow in mm;  $S$ =retention parameter in mm and is related to N number in the following way (where N is adimensional):

**Cuadro 1. Precipitaciones máximas diarias calculadas para las estaciones empleadas de periodo de retorno 100 años. Table 1. Maximum daily precipitations calculated for the weather stations used under a 100-years return period.**

Estación pluviométrica	Nombre	Años de medición	Total de años con datos	Función de probabilidad seleccionada	Error estándar de ajuste (mm)	Precipitación máxima estimada (mm)
12063	Arcelia	1962-2003	42	GVE	5.95	107.5
12090	Tlalchapa	1966-2003	38	LPIII	1.77	107.0
15200	Palmar grande	1974-1989	16	Gumbel	2.15	141.0

satisfacer los volúmenes de intercepción, almacenamiento en depresiones, e infiltración, denominados abstracción inicial. Análisis empíricos sugieren que el número N está en función de cuatro factores: Grupo y uso de suelo, condición hidrológica (% de cobertura vegetal) y condiciones de humedad antecedente. La siguiente fórmula es usada para calcular el escurrimiento medio de una tormenta (Aparicio, 2005):

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad \text{Para } (P > 0.2S) \text{ de otra manera } Q=0 \quad (2)$$

donde,  $P_e$  = lámina escurrida en mm;  $P$  = precipitación de la tormenta en mm;  $S$  = parámetro de retención en mm, está relacionado al número N de la siguiente manera (donde N: adimensional):

$$S = \frac{25400}{N} - \frac{141}{142} \quad (3)$$

El gasto máximo instantáneo o gasto pico a la salida de la cuenca fue calculado internamente por el sistema HEC-HMS, representándose mediante las siguientes fórmulas (Aparicio, 2005):

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p} \quad (4)$$

$$Q_p = q_p P_e \quad (5)$$

$$t_p = \sqrt{\frac{tr}{0.6} + tr} \quad (6)$$

donde,  $Q_p$  = gasto máximo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $q_p$  = gasto pico unitario ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{mm}^{-1}$ );  $A$  = área de drenaje ( $\text{km}^2$ );  $t_p$  = tiempo pico (h);  $Tr$  = tiempo de retraso (h).

En el Cuadro 2 se presenta el uso del suelo identificado y el equivalente de acuerdo con McCuen (2005), grupo de suelo, su correspondiente condición hidrológica, y número N. El número de curva no requirió ajuste de pendiente por contar con pendientes de bajo orden en la cuenca.

Existen cuatro grupos hidrológicos de suelo basados en el potencial de escurrimiento (A, B, C y D) y van de menor a mayor.

El tiempo de retraso es el tiempo entre el centro de duración efectiva de la lluvia y el tiempo en que se alcanza el gasto pico. Para calcular el tiempo de retraso se usó la fórmula (USACE, 2003):

$$tr = \frac{2.5869 L^{0.8} * \left(\frac{S}{25.4} + 1\right)^{0.7}}{1900 * Y^{0.5}} \quad (7)$$

$$S = \frac{25400}{N} - \frac{141}{142} \quad (3)$$

Instantaneous maximum discharge, or peak discharge, at the watershed outlet was calculated internally by the HEC-HMS system, represented by the following formulas (Aparicio, 2005):

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p} \quad (4)$$

$$Q_p = q_p P_e \quad (5)$$

$$t_p = \sqrt{\frac{tr}{0.6} + tr} \quad (6)$$

where  $Q_p$  = peak discharge ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $q_p$  = peak unit discharge ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{mm}^{-1}$ );  $A$  = drainage area ( $\text{km}^2$ );  $t_p$  = peak time (h);  $Tr$  = lag time (h).

The land use identified and the equivalent soil group, according to McCuen (2005), its corresponding hydrologic condition, and N number are shown in Table 2. The curve number did not require slope adjustment since the watershed slopes are low order.

There are four hydrologic groups of soil based on runoff potential (A, B, C and D) in ascending order.

Lag time is the time lapsing between the center of effective rainfall duration and the time it reaches peak discharge. To calculate lag time, the following formula was used (USACE, 2003):

$$tr = \frac{2.5869 L^{0.8} * \left(\frac{S}{25.4} + 1\right)^{0.7}}{1900 * Y^{0.5}} \quad (7)$$

where  $tr$  = sub-basin lag time (h);  $L$  = sub-basin hydraulic length (m);  $Y$  = sub-basin slope (%);  $S$  = retention parameter (mm).

### Preparation of the HEC-GEOHMS model

A digital elevation model (DEM) with 15 m cell size was created by interpolating contour lines in vector format. HEC-GEOHMS (USACE, 2003) in the ArcView GIS software (ESRI, 1993) was then used to process DEM, delimit the watershed, divide it into sub-basins, and determine the morphometric characteristics by sub-basin (length, slope, area, etc.). The result of these processes was inserted into the HEC-HMS system.

### The HEC-HMS model

HEC-HMS is a model of aggregate parameters with spatial distribution. It operates by dividing a watershed into sub-basins,

**Cuadro 2. Número N usado por cada tipo de vegetación, grupo de suelo y condición de humedad antecedente tipo II.**  
**Table 2. N number used for each vegetation type, soil group and antecedent moisture condition type II.**

Escenario	Vegetación y uso del suelo	Uso seleccionado	Práctica	Grupo de suelo hidrológica	Condición	N	
1973	AT	Suelo agrícola	Surcos rectos	A	Pobre	72	
				B	Pobre	81	
	BQ	Robles-Álamos	-		B	Pobre	65
						Media	47
						Buena	30
	BQVS				B	Pobre	65
						Media	47
						Buena	30
	PZ	Salvia-Pastos	Sin tratamiento mecánico	B	Pobre	67	
	SBC	Robles-Álamos	-		A	Pobre	35
						Pobre	45
					B	Media	66
						Buena	60
						Buena	55
						Media	36
SBCVS				A	Buena	25	
				A	Pobre	66	
				B	Media	60	
					Buena	55	
					Buena	72	
2006	AT	Suelo agrícola	Surcos rectos	A	Buena	67	
				B	Pobre	81	
	BQ	Robles-Álamos	-		B	Buena	78
						Pobre	65
						Media	47
	BQVS				B	Buena	30
						Pobre	65
						Media	47
	PZ	Salvia-Pastos	Sin tratamiento mecánico	B	Buena	30	
	SBC	Robles-Álamos	-		B	Pobre	67
						Media	50
						Buena	35
					A	Pobre	45
						Buena	25
						Pobre	66
SBCVS				B	Media	60	
					Buena	55	
					Pobre	66	
					Media	60	
					Buena	55	

donde,  $tr$ =tiempo de retraso por subcuenca (h);  $L$ =longitud hidráulica de la subcuenca (m);  $Y$ =pendiente de la subcuenca (%);  $S$ =parámetro de retención (mm).

**Preparación del modelo HEC-GEOHMS**

Un modelo digital de elevación (MDE) con 15 m de tamaño de celda fue creado mediante la interpolación de las curvas de nivel en formato vectorial. Luego fue usado HEC-GEOHMS (USACE, 2003) del paquete SIG ArcView (ESRI, 1993) para procesar el MDE, delimitar la cuenca, dividirla en subcuencas y determinar las características morfométricas por subcuenca (longitud, pendiente, área, etc.). El resultado de estos procesos fue insertado en el sistema HEC-HMS.

using the tributaries of the main stream as its initial criterion. The sub-basins can then be grouped by areas of approximately homogeneous vegetation, land use, soil group and hydrologic condition. This enables simulating the transformation of historical or hypothetical rainfall into discharge using a system that integrates several hydrologic methods. It can be used for watersheds without data when calculating the possible effects on runoff by changes in land use (Al-Abed *et al.*, 2005). It has three main modules: Watershed, precipitation, and control, which must be completely defined before beginning the simulation. There are five basic groups of information that must be fed into the HEC-HMS system: Historical or design rainfall, soil characteristics, morphometry of the sub-basins, hydrologic information of the process of transformation of rainfall into runoff, hydraulic information of

### El modelo HEC-HMS.

El HEC-HMS es un modelo de parámetros agregado con distribución espacial. Opera mediante la subdivisión de una cuenca en subcuencas tomando como criterio inicial los tributarios de la corriente principal. Luego se pueden agrupar por áreas aproximadamente homogéneas en la vegetación, uso de suelo, grupo de suelo y condición hidrológica. Permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en gasto mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos. Puede ser usado para las cuencas sin de datos en el cálculo de los efectos posibles en el escurrimiento por cambios en el uso del suelo (Al-Abed *et al.*, 2005). Tiene tres módulos principales: Cuenca, precipitación y control, que deben ser definidos completamente antes de iniciar la simulación. Hay cinco grupos básicos de información que deben ser suministrados al sistema HEC-HMS: Precipitación histórica o de diseño, características del suelo, morfometría de las subcuencas, información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escurrimiento, información hidráulica de los tramos de canal y de las capacidades de los embalses (métodos de tránsito) (McColl y Agget, 2007; Jenièek 2007).

Para modelar el escurrimiento fueron especificados los siguientes parámetros al sistema HEC-HMS: 1) Rn la infiltración, se seleccionó el método del número N; 2) en la transformación de la lluvia en escurrimiento fue usado el método del SCS (USACE, 2000); 3) para el flujo base el método seleccionado fue sin contribución del flujo base en el hidrograma de la subcuenca ya que es una cuenca sin datos de este tipo, considerando sólo el flujo directo. La simulación fue realizada para 48 h para observar el hidrograma completo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Mapas temáticos obtenidos y validación

En la Figura 2 se presentan los mapas temáticos obtenidos y la cartografía de INEGI 1980 y del Inventario Nacional Forestal 2000, elaboradas a una escala 1:250 000. Para validar satisfactoriamente un mapa temático se debe tener una exactitud superior a 0.8. Sin embargo, no fue posible obtener ese valor en todas las clases debido a la baja calidad de los mapas de referencia, ocasionada principalmente por la alta inconsistencia (error de etiquetado y detalle pobre de las bases de datos). Esto se reflejó en la baja exactitud (0.50) general mediante las matrices de confusión entre los mapas elaborados y los mapas de referencia. No obstante, la exactitud para cada clase temática varió considerablemente; la más alta, 0.94, fue para la categoría de agricultura de temporal (AT) digitalizada en la imagen QuickBird 2006, mientras que en el mapa temático generado de 1973 para la misma categoría la exactitud fue poco más de 0.6. En un orden descendente con base en su exactitud, el bosque de encino (BQ) fue segundo con un valor cercano a 0.7, mientras que el pastizal (PZ) tuvo una exactitud superior a 0.6

sections of canal and of dam capacities (transit methods) (McColl and Agget, 2007; Jenicek, 2007).

To model runoff, the following parameters were specified for the HEC-HMS system: 1) in infiltration the N number method was selected; 2) in transformation of rainfall into runoff, the SCS method (USACE, 2000) was used; 3) for base flow, the method selected did not consider base flow contribution in the hydrograph of the sub-basin since the watershed has no data of this type, and only direct flow was considered. Simulation was performed for 48 h in order to observe the complete hydrograph.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Thematic maps obtained and validation

The thematic maps obtained and the maps of INEGI 1980 and of the Inventario Nacional Forestal 2000, at a scale of 1:250 000 are shown in Figure 2. For a thematic map to be validated satisfactorily, it should have a precision above 0.8. This was not possible to obtain in all of the land use classes, however, because of the low quality of the reference maps due mainly to a high rate of inconsistency (errors in labeling and poor detail of the databases). This was reflected in the low general precision (0.50) by the confusion matrices between the constructed maps and the reference maps. Nevertheless, the precision for each thematic class varied considerably: the highest, 0.94, was for the category of rainfed agriculture (AT) digitalized in the QuickBird 2006 image, while the 1973 thematic map generated for the same category had a precision of slightly above 0.6. In descending order of accuracy, the oak forest (BQ) was second with a value of nearly 0.7, while grassland (PZ) had precision above 0.6 in the two generated thematic maps. In spite of the low congruence between the official maps and the generated maps, current land use map (2006) generated by screen photointerpretation of the QuickBird image was highly reliable, since it was corroborated by field explorations which reduced errors to a minimum.

### Analysis of change

Given that the study area is in a transition zone between the vegetation characteristic of the Mid Balsas watershed and that of the Central Neovolcanic region, it was possible to find vegetation types belonging to temperate (BQ) and tropical (SBC) climates and their respective disturbed forms (with secondary vegetation). The predominant vegetation found in all of the dates of analysis was oak forest (BQ) followed by oak forest with secondary vegetation (BQVA), and to a lesser degree low deciduous tropical forest with secondary vegetation (SBCVS). These types of vegetation respond to the eminent forest aptitude of the watershed, with

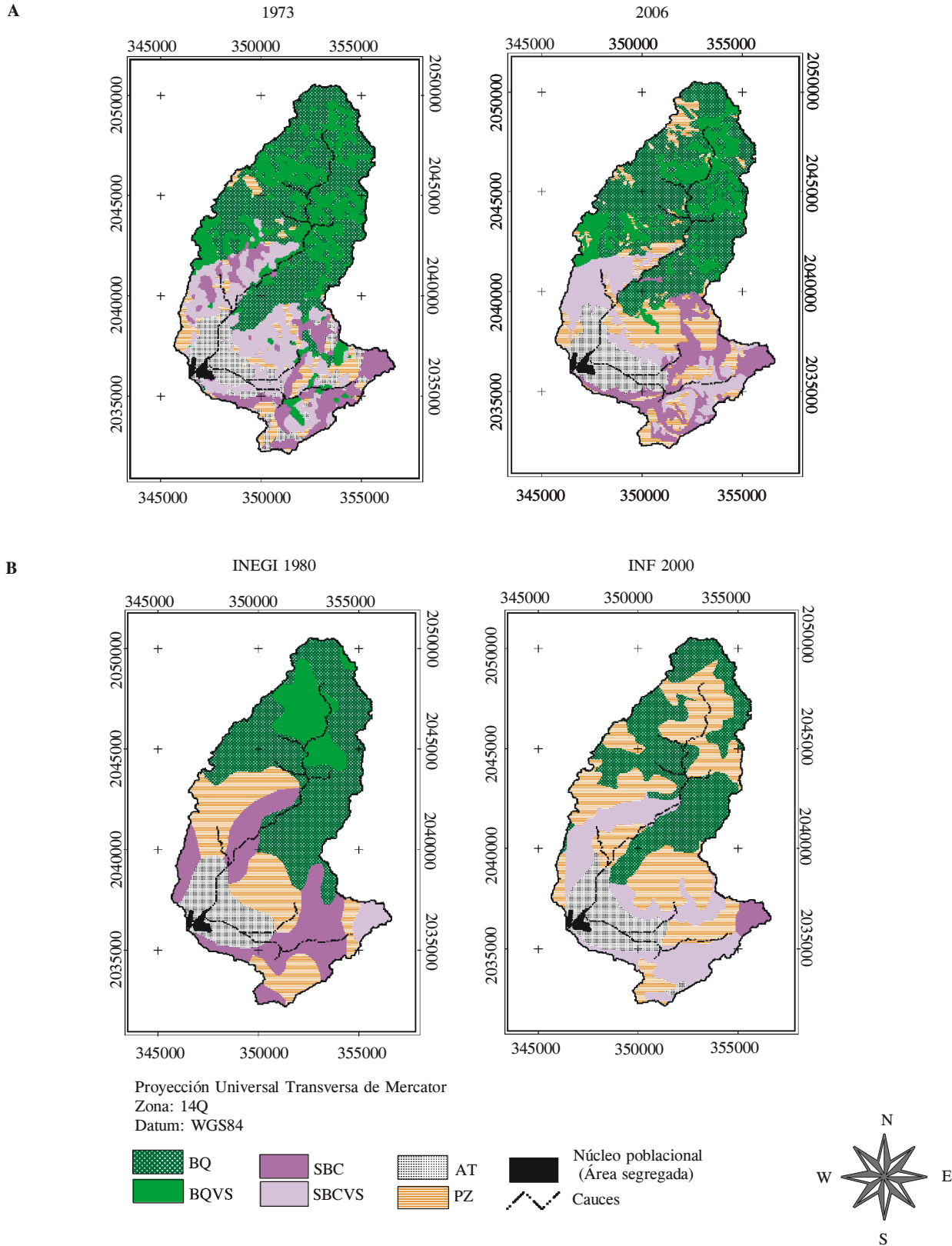


Figura 2. Mapas de vegetación y uso del suelo para cada fecha de análisis: A) Imágenes clasificadas; B) mapas temáticos de referencia.  
Figure 2. Vegetation and land use maps for each date of analysis. A) Classified images; B) thematic reference maps.



en los dos mapas temáticos generados. A pesar de la baja congruencia entre los mapas oficiales y los mapas generados, el mapa de cobertura (2006) elaborado mediante fotointerpretación en monitor de la imagen QuickBird fue altamente confiable dado que fue corroborado mediante visitas de campo, reduciendo el error al mínimo.

### Análisis de cambio

Dado que el área de estudio está en una zona de transición entre la vegetación propia de la cuenca del Medio Balsas y la región Neovolcánica Central, fue posible encontrar coberturas pertenecientes al clima templado (BQ) y cálido (SBC) y sus respectivas formas perturbadas (con vegetación secundaria). El tipo de cobertura predominante en todas las fechas de análisis fue el bosque de encino (BQ), siguiéndolo el bosque de encino con vegetación secundaria (BQVS) y en un menor grado la selva baja caducifolia con vegetación secundaria (SBCVS). Estos tipos de vegetación responden a la aptitud forestal eminente de la cuenca y con impacto sensible antropogénico reflejado en la presencia de vegetación secundaria. En las partes bajas y cercanas al núcleo poblacional hubo presencia de agricultura de temporal (AT) (Figura 3).

Las tasas de cambio para las coberturas de AT (0.06), BQ (0.26), SBC (0.08) y PZ (2.6) indican aumento, mientras que BQVS (-1.36) y SBCVS (-0.94) muestran pérdida. La matriz de cambio de uso del suelo para el periodo de análisis se presenta en el Cuadro 3. Los valores más altos se encontraron en la diagonal, interpretándose como una tendencia a la permanencia o una consistencia entre los pares de mapas de cobertura en cada fecha de análisis.

En la Figura 4 hay diferentes procesos de degradación detectados: 1) Conversión de coberturas arbóreas de bosque de encino y selva baja, natural y con vegetación secundaria a pastizal; 2) cambio de selva baja, natural y con vegetación secundaria a agricultura de temporal. Dadas las condiciones de baja humedad y difícil acceso al bosque de encino sólo se registró su cambio a pastizal. La tasa de deforestación calculada para el periodo 1973-2006 fue -0.38%. A diferencia de lo reportado por Velázquez *et al.* (2002), dicha tasa es relativamente pequeña respecto a otras reportadas para otros lugares de México, (entre 1 y 10% anual).

### Modelación hidrológica en HEC-HMS

#### Gastos máximos estimados

Los hidrogramas para cada año de análisis (Figura 5) presentan aumento en el gasto, pero sin diferencias

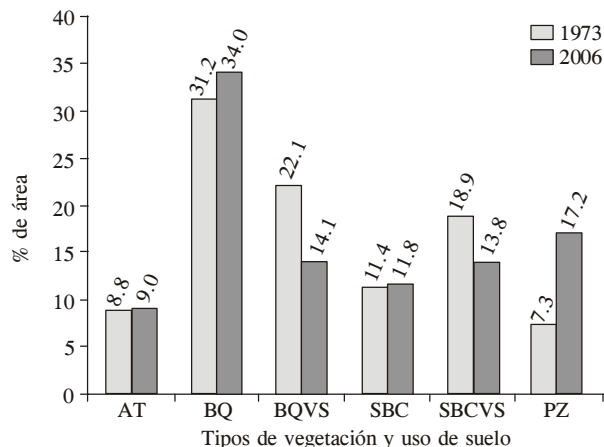


Figura 3. Porcentaje de área por cada tipo de vegetación y uso del suelo para cada fecha de análisis.

Figure 3. Percentage of area by vegetation type and land use for each date of analysis.

visible anthropogenic impact reflected in the presence of secondary vegetation. In the lower parts and near the population nucleus, rainfed agriculture (AT) was present (Figure 3).

Vegetation and land use change rates for AT (0.06), BQ (0.26), SBC (0.08) and PZ (2.6) indicate an increase, while those for BQVS (-1.36) and SBCVS (-0.94) show losses. The land use change matrix for the period of analysis is presented in Table 3. The highest values were found on the diagonal, which can be interpreted as a tendency toward permanence or consistency between the pairs of vegetation and land use maps on each date of analysis.

In Figure 4 different processes of degradation are detected: 1) Conversion from oak forest cover and tropical deciduous forest, with natural and secondary vegetation to grasslands; 2) change from tropical deciduous forest, with natural and secondary vegetation, to rainfed agriculture. Given the conditions of low moisture and difficult access to the oak forest, only its change to grassland was registered. The deforestation rate calculated for the 1973-2006 period was -0.38%. Unlike that reported by Velázquez *et al.* (2002), this rate is relatively low compared to others reported for other sites in Mexico (between 1 and 10% annual).

### Hydrologic modeling in HEC-HMS

#### Estimated maximum discharges

The hydrographs for each year of analysis (Figure 5) show an increase in discharge, but with no statistical differences (Duncan test) (García *et al.*, 2001). These results are comparable to those obtained by Caissie *et*

**Cuadro 3. Matriz de cambio (%) para el periodo 1973-2006.**  
**Table 3. Change matrix (%) for the period 1973-2006.**

		2006							
		Después	AT	BQ	BQVS	PZ	SBC	SBCVS	Total
1973	AT		6.02	0.00	0.00	0.20	0.17	2.61	9.00
	BQ		0.00	21.67	10.50	0.54	0.67	0.69	34.07
	BQVS		0.00	5.57	7.74	0.15	0.05	0.62	14.13
	PZ		1.45	2.64	1.80	3.55	2.10	5.70	17.23
Antes	SBC		0.74	1.21	1.31	1.26	4.93	2.29	11.74
	SBCVS		0.64	0.15	0.81	1.68	3.53	7.03	13.83
	Total		8.85	31.24	22.16	7.37	11.44	18.93	100.00

estadísticas (prueba de Duncan) (García *et al.*, 2001). Estos resultados son comparables a los obtenidos por Caissie *et al.* (2002) quienes no presentan diferencias en el estudio del gasto pico. Sin embargo, Beschta *et al.* (2000) al evaluar la respuesta en el gasto pico por el corte de los árboles del bosque, encontraron que el escurrimiento aumentó en un año para cuencas pequeñas pero disminuyó para eventos de periodos de 5 años; en cuencas grandes mediante el análisis de regresión múltiple, el gasto no fue diferente sino hasta hacer un análisis de medias en el cual hubo 1 a 7 % de diferencias significativas. Con base en lo anterior, no encontrar cambio en el gasto para la cuenca analizada no sorprende dado que la pérdida de cobertura arbórea en el periodo de análisis se dio hacia cobertura con vegetación secundaria y hacia pastizal, coberturas que no favorecen el escurrimiento superficial, donde el valor promedio ponderado del número N fue 51.55 en 1973 y 57.87 en 2006.

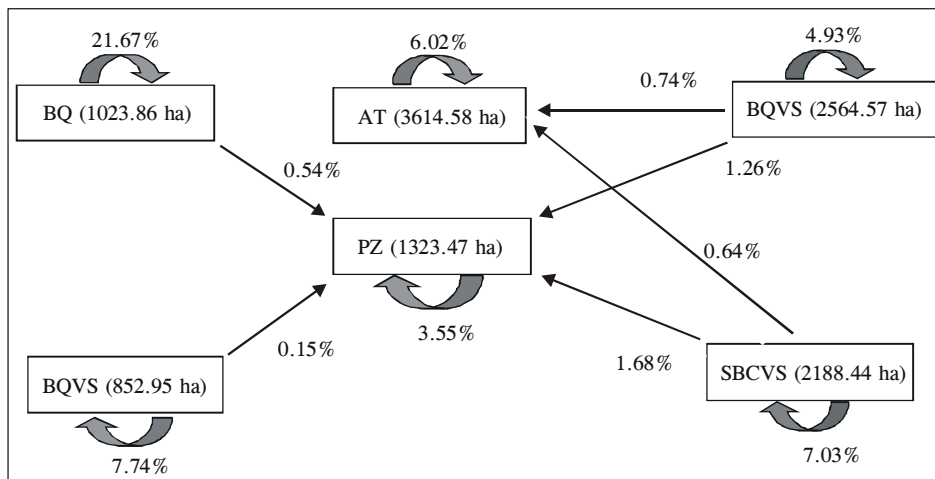
**Análisis estadístico**

Antes de usar el procedimiento de comparación de medias, el contraste F de varianzas en muestras

*al.* (2002) who did not report differences in the study of peak discharge. However, Beschta *et al.* (2000), evaluating the response in peak discharge to felling forest trees, found that runoff increased in one year for small watersheds but decreased for events of 5 year periods; in larger watersheds using multiple regression analysis, discharge was not different until an analysis of means was performed in which there were significant differences of 1 to 7 %. On this basis, not finding changes in discharge for the watershed analyzed is not surprising, given that loss of tree cover in the period of analysis gave way to cover with secondary vegetation and then to grassland, covers that do not favor overland flow, where average weighted N number was 51.55 in 1973 and 57.87 in 2006.

**Statistical analysis**

Before using the procedure of comparison of means, the F contrast of variances in independent samples was used to verify equal variance in the variables of interest: N number and lag time. In all of the tests the null hypothesis was accepted; that is, the data for N number and lag time have homogeneous variances



**Figura 4. El proceso de deforestación para el periodo 1973-2006.**  
**Figure 4. Process of deforestation for the period 1973-2006.**

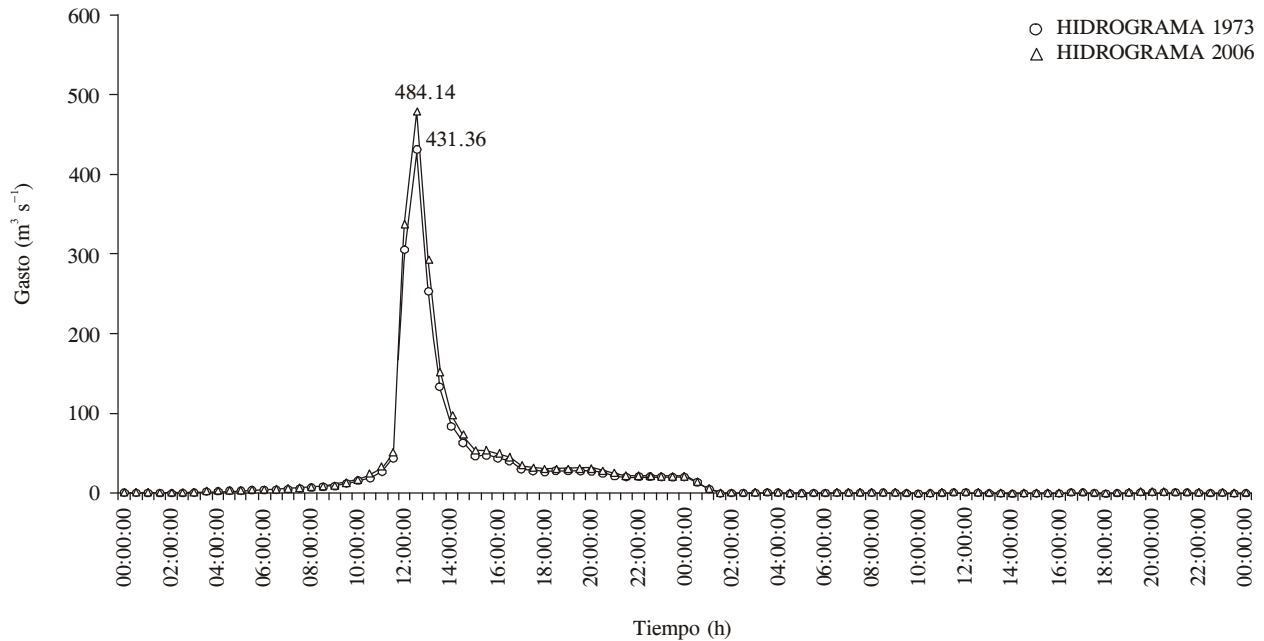


Figura 5. Hidrogramas a la salida de la cuenca para los años 1973 y 2006.  
 Figure 5. Hydrographs at watershed outlet for the years 1973 and 2006.

independientes fue usado para comprobar igual varianza en las variables de interés: Número N y tiempo de retraso. En todas las pruebas la hipótesis nula fue aceptada, es decir, los datos de número N y tiempo de retraso tienen homogeneidad de varianzas (homocedasticidad) y sí pueden ser analizados con herramientas estadísticas como la prueba de Duncan (García *et al.*, 2001). Luego las medias fueron analizadas con la prueba de Duncan procesando los datos en SAS (SASI, 1998). No hubo diferencias ( $p > 0.05$ ) entre las medias del número N y las medias del tiempo de retraso.

### CONCLUSIONES

No hubo efectos significativos del cambio de uso del suelo en el gasto pico empírico de 100 años de periodo de retorno a la salida de la cuenca ( $431 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en 1973 y  $484 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en 2006), probablemente debido a que los principales cambios fueron de coberturas arboladas a pastizales que registran números N similares (51.55 en 1973 y 57.87 en 2006). Aunque la cuenca del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero, no tiene datos de aforo y no pudo ser calibrada, dichos cálculos pueden ser ratificados mediante métodos regionales y otros procedimientos hidrológicos.

### LITERATURA CITADA

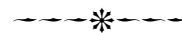
Aparicio M., F. J. 2005. Fundamentos de Hidrología de Superficie. LIMUSA. México, D.F. 303 p.

(homocedasticity) and can be analyzed with statistical tools such as the Duncan test (García *et al.*, 2001). Means were then analyzed with the Duncan test processing the data in SAS (SASI, 1998). There were no differences ( $p > 0.05$ ) among N number means or among lag time means.

### CONCLUSIONS

There were no significant effects of land use change on empirical peak discharge over the 100-year return period at the watershed outlet ( $431 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in 1973 and  $484 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), probably because the main changes were from tree cover to grassland, which registered similar N numbers (51.55 in 1973 and 57.87 in 2006). Although the ungauged watershed of the Rio Grande, Tlalchapa, Guerrero, could not be calibrated, these calculations can be ratified using regional methods and other hydrologic procedures.

—End of the English version—



- Al-Abed, N., F. Abdulla, and A. Abu K. 2005. GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin. *Environ. Geol.* 47: 405-411.
- Andréassian, V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydro.* 291: 1-27.
- Beschta, R. L., M. R. Pyles, A. E. Skaugset, and C. G. Surfleet. 2000. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *J. Hydrol.* 233: 102-120.

- Caissie, D., S. Jolicoeur, M. Bouchard, and E. Poncet. 2002. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *J. Hydro.* 258: 232-248.
- Campos, A. D. F. 2008. Contraste de predicciones de precipitación diaria con resultados regionales en la zona huasteca de San Luis Potosí. *Tlálac AMH* 40: 23-34.
- ESRI, 1999. ArcView GIS v.3.2. Environmental Systems Research Institute, Inc. New York.
- García, V. J. A., M. A., Castillo, M. E., Ramírez G. S. G., Rendón, y M. U. Larqué S. 2001. Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhoffer para la selección de medias. *Agrociencia* 35: 79-86.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2006. Extractor Rápido de Información Climatológica III, v. 1.0. Información climatológica disponible en formato electrónico. Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1999. Carta edafológica. Escala 1:50,000. E14A65 de Ciudad Altamirano y E14A75 de Palmar Chico. México, D. F.
- Kite, G. W. 1977. Frequency and Risk Analyses in Hydrology. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado. USA. pp: 156-163.
- Jenièek, M. 2007. Rainfall-runoff modeling in small and middle-large catchments - an overview. *Geografie- Sbornik* 111(3): 305-313.
- Lambin, E. F., B. L. Turner, H. Geist, S. B. Agbola, A. Angelsen, J., W. Bruce, O. T. Coomes, V. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. A. Veldkamp, C. Vogel, and J. Xu. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environ. Change* 11: 261-269.
- Leyca Geosystems. 2003. ERDAS IMAGINE 8.7. Documentos técnicos en formato digital. 655 p.
- McCull, C., and G. Agget. 2007. Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. *J. Environ. Manage.* 84(4): 494-512.
- McCuen, R. H. 2005. Hydrologic Analysis and Design. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Maryland. Prentice Hall. 859 p.
- Melesse, A. M., W. D. Graham, and J. D. Jordan. 2003. Spatially distributed watershed mapping and modeling: GIS-based storm runoff response and hydrograph analysis: part 2. *J. Spatial Hydro.* 3(2): 1-28.
- Palacio, P. J. L., M. T. Sánchez, S. J. M. Casado, I. E. Propin, F. J., Delgado, C. A. Velázquez, M. L. Chias, B. M. I. Ortiz, A. J., González, S. G. Negrete, F. J., Gabriel M., y R. Márquez H. 2004. Indicadores para la Caracterización y Ordenamiento del Territorio. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Instituto de Geografía de la UNAM y Secretaría de Desarrollo Social. Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM. México. 161 p.
- Perevotchikova, M., y F. García, J. 2006. Análisis cualitativo de la red hidrométrica actual del estado de Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM* 61: 24-37.
- Rao, A. R., and K. H. Hamed. 2000. Flood Frequency Analysis. Chapter 7: Extreme value distributions. CRC Pres. Boca Raton, Fla. pp: 207-223.
- SASI (Statistical Analysis System). 1998. SAS Language Guide for Personal Computers. Release 6.03. Cary, N. C. SAS Institute Inc. 1104 p.
- USACE (United States Army Corps of Engineers). 2000. Hydrologic Modeling System-HEC-HMS: Technical Reference Manual. USACE, Washington, DC.
- USACE (United States Army Corps of Engineers), 2003. Geospatial Hydrologic Modeling Extension, HEC-GeoHMS: User's Manual, Version 1.1. USACE, Davis, CA, USA.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra, y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica, Instituto Nacional de Ecología* 62: 21-37.
- Zorraquino, J. C. 2004. El Modelo SQRT-ET<sub>MAX</sub>. *Revista de Obras Públicas* 3447: 33-47.