

Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México

CARLOS DÍAZ DELGADO, KHALIDOU MAMADOU BÂ, ANTONIO ITURBE POSADAS,
MARÍA VICENTA ESTELLER ALBERICH Y FRANCISCO REYNA SAENZ*

Recepción: 07 de diciembre de 1998

Aceptación: 15 de febrero de 1999



Estimation of Physiographical Characteristics of a Watershed Using GIS and DEM: Case of the Upper Basin of the Lerma River, State of Mexico

Abstract. *This paper shows the use of the Geographic Information Systems (GIS) and the Digital Elevation Model (DEM), which are the basic elements to achieve the development of any hydrological study, as useful tools in order to obtain the physiographical characteristics of a watershed. The Upper Basin of the Lerma River (Curso Alto del Río Lerma, CARL), located in State of Mexico, was taken as a study case. The main hydrological parameters of the CARL have been evaluated and their implications with the water cycle are discussed.*

Introducción

El análisis de gran parte de los fenómenos hidrológicos que ocurren sobre un determinado espacio geográfico suele tener como referencia a la unidad fisiográfica conocida como cuenca. La cuenca es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y donde los excedentes de agua convergen

en un punto espacial único: la exutoria (Llamas, 1993).

La exutoria posee un determinado flujo anual, que se ve determinado por las condiciones climáticas locales y regionales, así como por el uso del suelo prevaleciente. Las características físicas de una cuenca desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de parte de los componentes del ciclo hidrológico, tales como la evaporación, infiltración, flujo superficial, entre otros. Las principales características físicas que se consideran en investigaciones hidrológicas son las concernientes a la cuenca, a la red de drenaje y al cauce o río principal.

* Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México, México, C. P. 50130.

Correo electrónico: rdiaz@coatepec.uaemex.mx

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos CONACYT 0389-T y UAEM 1069/95. Los autores reconocen la contribución de Juan A. García Aragón, Paulino Delgado Martínez, Mario Mendoza Flores y Ma. de los Angeles Domínguez quienes han participado de manera importante en las diversas etapas de implantación del Sistema de Información Geográfica Hidrológico del curso alto del río Lerma (SIGCARL).

Es necesario hacer énfasis en la contribución de diferentes fuentes de información y agradecer la accesibilidad a los datos que conforman la base del SIGCARL por parte de distintas dependencias gubernamentales nacionales y estatales, y a otras como: Comisión Nacional del Agua, delegación Estado de México; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Protectora de Bosques del Estado de México, PROBOSQUE; Instituto de Geografía, UNAM; Observatorio Meteorológico Nacional y Facultad de Geografía, UAEM.

En la tabla 1, se enumeran estos parámetros (Campos, 1992; Chow *et al.*, 1994 y Llamas, 1993).

Con base en los avances logrados en los desarrollos tecnológicos en geoinformática, se ha logrado que los parámetros citados se obtengan de forma automatizada, por medio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) e Información Altitudinal Digital. Diversos algoritmos inscritos en los *software* pueden derivar las corrientes superficiales, las delimitaciones de cuencas y otros aspectos complementarios.

Casi la totalidad de los parámetros físicos son obtenidos tradicionalmente a través de cálculos manuales. Por ejemplo, la elevación, de la cual se desprende la curva hipsométrica, es resultado de la identificación de rangos altitudinales y su cuantificación areal se realiza a través de métodos como la balanza analítica, el uso del papel milimétrico o con el empleo de planímetros mecánicos. Sin embargo, estos procesos se caracterizan por un notable consumo de tiempo y, en ocasiones, imprecisiones implícitas por la técnica utilizada.

Desde la década de los sesenta, los SIG se han consolidado como herramientas sin igual para el análisis y modelación de fenómenos donde lo espacial es parte del objeto de estudio. En efecto, su aplicación en disciplinas relacionadas con los recursos naturales tiene un importante desarrollo a nivel internacional (Hunsaker *et al.*, 1993).

Es de resaltar que la fuente de información básica para este tipo de trabajos la constituye los datos de la altitud del terreno. Han sido desarrollados diversos algoritmos para el análisis automatizado del relieve terrestre, que incorporan la tercera dimensión y permiten, por ejemplo, el cálculo de la inclinación del terreno, o conocer el aspecto o volúmenes de una zona.

La representación digital y continua de los valores de

altura del terreno, referidos a un *datum* en común y a teselas, es conocida como Modelo de Elevación Digital del Terreno (MEDT). Los MEDT son, numéricamente, una matriz con valores igualmente espaciados en el interior de una superficie y se constituyen en arreglos de columnas y renglones de resolución definida, donde una celda describe el valor de la altura y donde se asume que el valor es continuo dentro de cada unidad (pixel o celda).

Los MEDT son normalmente generados a través de la interpolación de los valores de altura contenidos en entidades puntuales, por medio de líneas que unen puntos de igual valor (isohipsas) y a través del uso de imágenes de satélite. La correlación automática de imágenes de satélite para la obtención de modelos de elevación del terreno se ha aplicado principalmente a imágenes SPOT (Sistema para la Observación de la Tierra) y fotografías aéreas digitales, que utilizan las zonas de traslape de tomas adyacentes (Vargas, 1993).

Aun cuando los datos espaciales continuos de la altura de la superficie sobre el nivel del mar son por lo regular almacenados de acuerdo con el modelo teselar (raster), existe la alternativa de ser organizados mediante el modelo vectorial con el uso de la estructura de datos conocida como TIN (Triangular Irregular Network), la cual está compuesta por dos elementos básicos: puntos con valores x, y, z y una serie de líneas que unen estos puntos para formar una red de triángulos (ESRI, 1992).

La manipulación de los datos de altura con métodos de análisis morfométricos, desarrollados por diversas ciencias de la tierra, puede dar lugar a la obtención de diversos parámetros cuantitativos, tales como la densidad de disección del relieve, la profundidad de erosión o disección, o la energía o amplitud del relieve. De igual forma, diversos parámetros hidrológicos se pueden conseguir si se tienen como soporte los algoritmos disponibles para

TABLA 1

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS BÁSICAS A CONSIDERAR EN EL ESTUDIO HIDROLÓGICO DE UNA CUENCA

CUENCA	DRENAJE	RÍO PRINCIPAL
SUPERFICIE	ORDEN DE CORRIENTES	PENDIENTE
PERIMETRO	DENSIDAD DE DRENAJE	LONGITUD
FORMA	DENSIDAD HIDROGRÁFICA	COEFICIENTES DE SINUOSIDAD
COEFICIENTE DE COMPACIDAD		
RELACIÓN DE CIRCULARIDAD		
RELACIÓN DE ELONGACIÓN		
CURVA HIPSOMÉTRICA Y ELEVACIÓN MEDIA	RELACIÓN DE BIFURCACIÓN	PERFIL LONGITUDINAL
RECTÁNGULO EQUIVALENTE		
PENDIENTE		
ORIENTACIÓN		

procesar datos de elevación continuos. La forma de una superficie determina cómo se comportará un flujo sobre ésta y permite delinear sistemas de drenaje y cuantificar algunas características del sistema.

Por otro lado, es importante señalar que el uso de los sistemas de información geográfica en la Universidad Autónoma del Estado de México no es nuevo, en este tipo de trabajos destacan aplicaciones concretas presentadas en diferentes trabajos de tesis tales como la investigación de Cámara (1992) orientada a la evaluación de suelos aptos para el desarrollo forestal y la de Domínguez *et al.* (1998) quienes realizaron un inventario y análisis de los recursos bióticos del Estado de México. Igualmente se han llevado a cabo trabajos de connotación conceptual, como el de Franco (1993), quien hace referencia a las contradicciones de la cartografía automatizada en México y, en parte, a los límites de la cartografía automatizada y de los SIG. Probablemente, uno de los trabajos de investigación de mayor aporte por las innovaciones que presenta en la aplicación de los SIG y que utiliza métodos de análisis multicriterio, es el realizado recientemente por Franco (1998), que se caracteriza por la presentación de un marco metodológico para la ubicación de sitios integrales de desechos industriales en el valle de Toluca.

Con respecto a las aplicaciones de los SIG desarrolladas en torno a la ingeniería hidráulica, se tienen como referencia los trabajos realizados por Díaz Delgado *et al.* (1998a y 1998b) en los que se expone la importancia de la calidad de datos geográficos para la obtención de análisis espaciales bajo el uso de SIG, así como el desarrollo de un SIG orientado al análisis geográfico-hidrológico del curso

alto del río Lerma.

El objetivo principal del presente trabajo es la aplicación de los SIG en la obtención de parámetros físicos de una cuenca, los cuales son elementos iniciales para el desarrollo de cualquier investigación hidrológica. Como caso de estudio se escogió al curso alto del río Lerma (CARL), para el cual se estiman dichos parámetros, así como la implicación de éstos en los procesos relacionados con el ciclo del agua.

I. Materiales y métodos

Las características físicas de la cuenca del CARL fueron obtenidas con el procesamiento de un MEDT con resolución de 90 metros. La resolución del MEDT es la apropiada para un estudio a escala 1:250,000, y los resultados obtenidos están en función de esta consideración; es decir, la realización de mayores precisiones en los aspectos aquí abordados es posible con el empleo de datos con mayor detalle espacial. La información fuente corresponde a las curvas de nivel contenidas en la *Carta Geográfica del Estado de México* (IGCEM, 1995).

El MEDT de la cuenca alta del río Lerma fue generado por medio de las funciones de análisis de los *software* de SIG Arc/INFO ver. 7.1.2 (módulo *Triangular Irregular Network*, TIN) y ArcVIEW 3.0a.

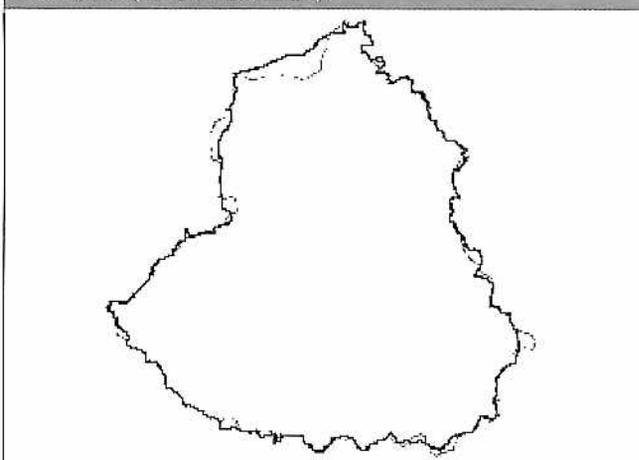
II. Aplicación

1. Delimitación del parteaguas

El límite del área de estudio, el parteaguas, fue extraído y digitizado de cartas 1:50,000 para contar con una mejor definición, así como para contrastar los resultados conseguidos por el uso del MEDT. El MEDT de la cuenca alta del río Lerma fue procesado por medio de las funciones de análisis de obtención de cuencas con las funciones *watershed*, *waterflow*, *flow accumulation* de los *software* de SIG utilizados.

En la figura 1 se muestra el resultado de la consecución de la cuenca con base en la superficie altitudinal numerizada. La línea color negro indica el parteaguas realizado tradicionalmente a partir de cartografía con escala 1:50,000. Las líneas punteadas son el resultado de los algoritmos predefinidos para el logro de las áreas de captación pluvial, en el orden de escala 1:250,000. El área extraída a escala 1:50,000 es de 2116.76 km², contra una diferencia menor al 5% con respecto a la obtenida automáticamente. Se considera, a partir de estos resultados, que el empleo de modelos de elevación a una escala

FIGURA 1. DELIMITACIÓN DE CUENCAS MANUALMENTE A ESCALA 1:50,000 (NEGRO) Y AUTOMÁTICAMENTE A ESCALA 1:250,000 (LÍNEA PUNTEADA).



más grande, así como la ubicación de puntos de área de acumulación fluvial pueden generar mejores resultados.

2. Características de la cuenca

a. Superficie

La superficie es considerada como el parámetro físico básico que define una cuenca. Usualmente este valor se extrae planimétricamente, a partir de la delimitación en mapas topográficos desde una perspectiva ortogonal y calculada por métodos manuales o a través del uso de sistemas CAD (Dibujo Asistido por Computadora). El área planimétrica aquí descrita fue obtenida por un proceso que implicó la rasterización del límite del parteaguas, donde se asignó un valor de 1 a su interior y 0 al exterior; por medio de álgebra matricial se multiplicó con el MEDT y se cuantificaron el número de celdas que se multiplicaron por la resolución correspondiente. El valor resultante fue de 2117.88 km².

Sin embargo, la superficie real es aquella que considera el factor pendiente, la cual incrementa la dimensión de las superficies, pero la diferencia entre los resultados es despreciable y una evaluación de tal tipo sólo se justificaría en casos de cuencas con terreno muy escarpado.

b. Perímetro

La longitud del perímetro de la cuenca también fue obtenida en forma planimétrica y a través de la contabilización del desnivel del terreno; para el primer caso, el resultado es de 239.50 km y de 241.79 km para el segundo.

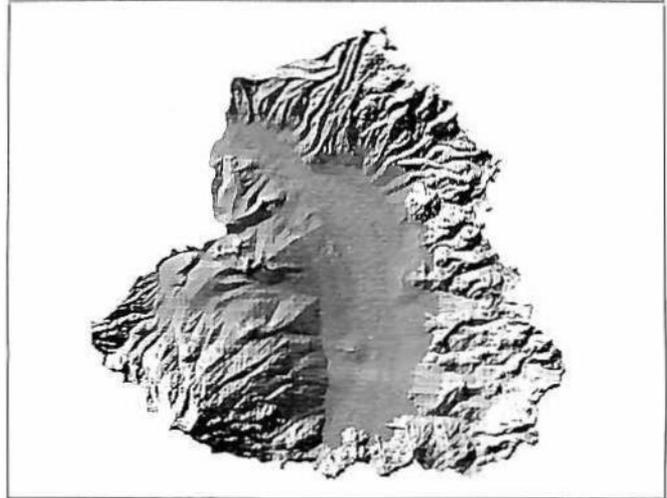
La figura 2 ilustra una perspectiva sombreada del relieve del área del curso alto del río Lerma. Es de resaltar la energía del relieve que sobresale en la porción sur por el Nevado de Toluca y en la porción oriental por la presencia de la sierra de las Cruces, lo que modifica, aunque no de manera significativa para el CARL, los resultados del área y perímetro, planimétrica y superficialmente.

c. Forma

La forma de la cuenca interviene de manera importante en las características del hidrograma de descarga de un río, particularmente en los eventos de avenidas máximas. En general, cuencas de igual área pero de diferente forma generan hidrogramas diferentes. Para determinar la forma de una cuenca se utilizan los coeficientes que a continuación se describen (Llamas, 1993).

Coficiente de compacidad (Kc): definido por Gravelius como la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie de la cuenca.

FIGURA 2. PERSPECTIVA SOMBRADA DEL RELIEVE EN EL ÁREA DEL CARL.



$$Kc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde P y A son el perímetro y la superficie de la cuenca, respectivamente. Este coeficiente es igual a uno cuando la cuenca es perfectamente circular; cuando Kc es igual a 1.128, se trata de una cuenca cuadrada. Este coeficiente puede alcanzar el valor de tres en el caso de cuencas muy alargadas. En el caso del CARL $Kc = 1.481$, lo que indica es que la cuenca en estudio tiende a un cuadrado, es decir, que su largo y ancho son valores cercanos.

Relación de circularidad (Rci): Este coeficiente es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca.

$$Rci = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Su valor es unitario para una cuenca circular, para el caso de una cuenca cuadrada, corresponde a un valor de 0.785. En el CARL $Rci = 0.455$, valor que corrobora la cercanía de la forma de la cuenca con un cuadrado.

Los resultados de los parámetros de forma obtenidos indican que la cuenca en estudio está cercana a una simetría en sus dimensiones cartesianas, lo que hidrológicamente implicaría hidrogramas casi simétricos en su desembocadura.

Relación de elongación (Re): Definido por S. A. Schumm como la relación entre el diámetro (D) de un círculo que tenga la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima (Lm) de la cuenca. Lm , a su vez, se define como la más grande dimensión de la cuenca a lo largo de una

línea recta trazada desde la desembocadura hasta el límite extremo del parteaguas y de manera paralela al río principal (Campos, 1992; Llamas, 1993).

$$Re = \frac{D}{Lm} = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Lm} = 1.128 \frac{\sqrt{2117.88}}{48.65} = 1.07$$

El valor de *Re* se acerca a la unidad cuando la cuenca es plana; para cuencas con relieve pronunciado, el valor resultante se encuentra entre 0.6 y 0.8. El radio de elongación del CARL es 1.07, por lo tanto, a partir de este valor se puede inferir que la cuenca es plana con porciones accidentadas.

d. Curva hipsométrica y elevación media del CARL

Los datos de elevación son significativos sobre todo para considerar la acción de la altitud en el comportamiento de la temperatura y la precipitación. La curva hipsométrica refleja con precisión el comportamiento global de la altitud de la cuenca. Para la generación de esta curva es necesario llevar a cabo un proceso de reclasificación del MEDT, según los intervalos deseados y realizar de nueva cuenta un proceso de cálculo de área en cada rango. Este resultado se condensa en la tabla 2 y la curva y mapa hipsométricos en la figura 3.

Otros datos que pueden ser igualmente obtenidos como producto de este proceso son la altura máxima, que para el caso del CARL es de 4549 msnm; la altitud media es de 2848 msnm y la altitud mínima es de 2556 msnm.

De acuerdo con la clasificación de Stahler (Llamas, 1993; Campos, 1992), la curva hipsométrica del CARL corresponde a la de una cuenca erosionada, y clasificada como de valle o sedimentaria, pues se encuentra en la fase de *monadnock* (vejez).

Por otro lado, con base en un proceso de reclasificación del MEDT, y de asignación de la gama adecuada de colores, puede ser generado un mapa hipsométrico tal como se muestra en la figura 3.

e. Rectángulo equivalente

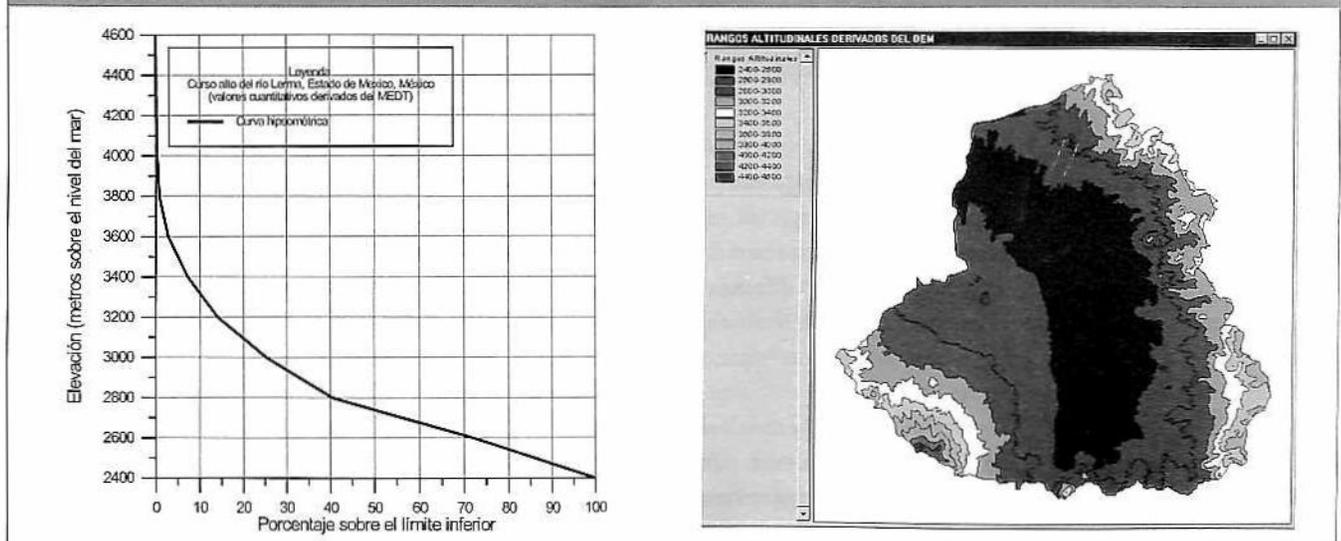
Para poder comparar de manera preliminar el comportamiento hidrológico de dos cuencas, se utiliza la noción del rectángulo equivalente (Llamas, 1993; Campos, 1992). Se trata de una transformación geométrica en virtud de la cual se asimila la cuenca a un rectángulo que tenga el

TABLA 2

CURVA HIPSONÉTRICA: VALORES CUANTITATIVOS DERIVADOS DEL MEDT

CURVAS DE NIVEL (MSNM)	PORCENTAJE DEL TOTAL	SUPERFICIE ENTRE LAS CURVAS (M ²)	PORCENTAJE SOBRE EL LÍMITE INFERIOR
2400-2600	28.08	594.79	100.00
2600-2800	31.55	668.16	71.92
2800-3000	15.06	318.89	40.37
3000-3200	11.18	236.85	25.31
3200-3400	6.98	147.76	14.123
3400-3600	4.37	92.60	7.15
3600-3800	2.01	42.67	2.78
3800-4000	0.46	9.66	0.77
4000-4200	0.23	4.85	0.31
4200-4400	0.07	1.47	0.08
4400-4600	0.01	0.16	0.01

FIGURA 3. CURVA Y MAPA HIPSONÉTRICOS DEL CARL DERIVADOS DEL MEDT.



mismo perímetro y la misma superficie. De esta forma, las curvas de nivel se transforman en rectas paralelas a los lados menores del rectángulo y donde la desembocadura de la cuenca es uno de estos lados (Llamas, 1993). Los lados del rectángulo están definidos por la siguiente ecuación:

$$L_2, L_1 = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.128} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right]$$

Donde L_2 es el lado mayor, L_1 el lado menor. Para que esta representación sea posible, es necesario que el coeficiente de compacidad Kc sea mayor o igual que 1.128. Para el CARL, $L_2 = 99.57$ km y $L_1 = 21.27$ km. El rectángulo equivalente del CARL se presenta en la figura 4.

f. Pendiente

La pendiente de la cuenca tiene una relación importante con los fenómenos de infiltración, escurrimiento superficial, humedad del suelo y con la contribución del agua subterránea al flujo de los cauces (Campos, 1992). Para la obtención aproximada de la pendiente media de una cuenca se aplica, por lo general, una fórmula que implica el uso de las variables de la elevación máxima y el perímetro de la cuenca. Otros procedimientos más exactos son aquellos donde se realiza la cartografía manualmente. A través del empleo de reglas con determinadas pendientes, se ajusta a las áreas entre curvas de nivel con esos valores y se colorea para indicar el grado de inclinación del relieve. Estos procedimientos, sin embargo, se caracterizan por ser imprecisos y laboriosos.

Una vez que se cuenta con el MEDT, se aplica el algoritmo correspondiente, implícito en la mayoría del *software* de SIG, y se calcula el ángulo de inclinación del terreno, sin que se dejen de considerar los desniveles de altura de las cuatro celdas más próximas a la celda en turno. De esta forma, y para cada celda, se obtiene el ángulo de inclinación del terreno en grados; donde la pendiente es la tangente del ángulo obtenido. Para conocer la inclinación media, se realiza un proceso de adición de todas las celdas y se divide entre el total de éstas. El resultado para éste y otros parámetros, comparados con los métodos tradicionales, puede ser significativo, puesto que implica la ventaja de una representación espacial de fácil interpretación.

El ángulo medio de inclinación y la pendiente media obtenida para el CARL es de 4.88 grados y de 8.54%, res-

FIGURA 4. RECTÁNGULO EQUIVALENTE DEL CARL (COTAS EN MSNM).

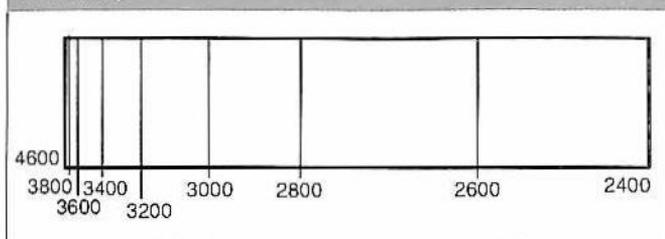
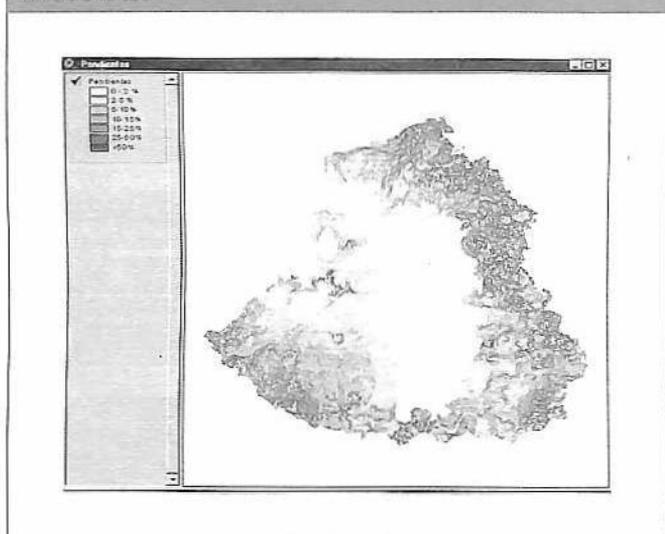


FIGURA 5. PENDIENTES DEL CARL AGRUPADOS EN CINCO CATEGORÍAS.



pectivamente. La pendiente mínima es de 0.00% y la máxima de 50.00%. En la figura 5 se muestran territorialmente las pendientes en el CARL.

Otra ventaja importante del empleo de los SIG en la obtención de parámetros físicos, es la cuantificación espacial de los procesos de reclasificación que se hagan sobre el MEDT y productos derivados. La tabla 3 muestra la extensión territorial de cada rango de pendientes que se presenta en el mapa de la figura 5.

g. Orientación

La orientación es la dirección geográfica de la pendiente del terreno. Este parámetro interviene en el número de horas que la cuenca es favorecida por la radiación solar, factor primordial en el cálculo de la evaporación potencial. En el caso de cuencas con cobertura de nieve y/o hielo importante, permite conocer cómo es el proceso de fusión de masas sólidas de agua.

Por lo regular este parámetro se extrae manualmente, con la desventaja de consumir mucho tiempo y acumular imprecisiones. Sin embargo, a partir del MEDT, es

posible realizar un proceso para derivar el aspecto u orientación de las laderas. Este algoritmo es aplicado a cada una de las celdas de la cuenca, lo que implica una mayor precisión. Así, la calidad de los resultados queda en función de la información geográfica de base (Palacio Prieto, *et al.*, 1991).

La orientación del terreno del CARL, agrupada en rangos de 90 grados se observa en la tabla 4, donde se aprecia

TABLA 3

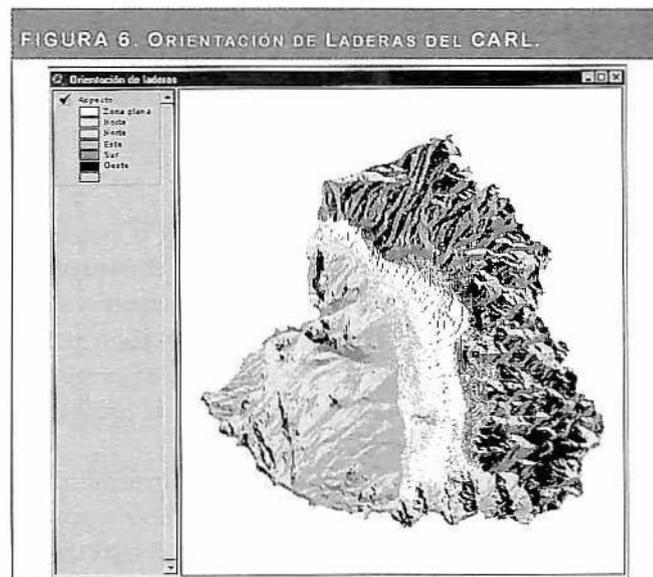
CUANTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE POR RANGOS DE PENDIENTE Y TIPO DE TERRENO

RANGOS DE PENDIENTE (%)	TIPO DE TERRENO (HERAS, 1976)	ÁREA (KM ²)
0-2	LLANO	697.54
2-5	SUAVE	372.30
5-10	ACCIDENTADO MEDIO	407.80
10-15	ACCIDENTADO	230.62
15-25	FUERTEMENTE ACCIDENTADO	240.03
25-50	ESCARPADO	169.59
>50	MUY ESCARPADO	0

TABLA 4

ORIENTACIÓN DE LA PENDIENTE DEL TERRENO DEL CARL

DIRECCIÓN DE LA PENDIENTE (GRADOS)		ÁREA (KM ²)
ZONAS PLANAS		490.67
N	315°-45°	452.71
E	45°-135°	407.14
S	135°-225°	334.38
W	225°-315°	432.98



el predominio de las zonas prácticamente sin inclinación; los rangos restantes son muy similares con base en el área que ocupan. La figura 6 contiene la expresión territorial de este parámetro físico.

2. Características del drenaje

El modelo de elevación digital implícitamente contiene las propiedades del relieve, tales como: la altitud, la orientación de las laderas y, con base en la discretización por celdas, las características del terreno en cuanto a la delimitación de los flujos hidrológicos. Así pues, la red de drenaje puede derivarse a partir de la aplicación de las funciones que generan para cada celda el curso del flujo. Éste es determinado por la dirección del escalonamiento descendente de cada celda del MEDT. De acuerdo con Jensen y Domingue (1988), la fórmula que se aplica para cada celda asociada a las ocho circundantes es la siguiente:

$$\text{Descenso del flujo} = \frac{\text{Cambio en el valor de la altitud } Z}{\text{distancia}} * 100$$

Una vez obtenida la dirección de flujo, fuente de datos para el proceso de acumulación de flujos, se obtiene la red hidrológica. La acumulación de flujos es el recuento de los valores del rumbo del flujo en un sentido de arriba hacia abajo, que implícitamente contiene el MEDT.

A partir del MEDT del CARL se aplicaron los procesos para la consecución de la dirección de flujo y su acumulación. El resultado de este proceso se muestra en la figura 7.

Es de resaltar que en el valle del CARL se presenta una acumulación excesiva de flujos (ríos). Esto en gran medida responde a dos consideraciones: a la resolución del modelo de elevación digital y a la mancha urbana del área metropolitana de la ciudad de Toluca, que altera de manera significativa los patrones originales de flujo hidrológico. La planicie natural se ha visto modificada por el movimiento de las fronteras urbanas; en donde los ríos y cauces naturales se han convertido en parte del drenaje urbano. Así pues, los rasgos antrópicos que inciden sobre los cauces naturales no han sido representados en la cartografía existente y por tal razón no son reconocidos por el MEDT. Es importante señalar que para la generación de los datos relativos a la red de drenaje se empleó la información contenida en las cartas a escala 1:50,000.

a. Orden de corrientes y relación de bifurcación

Horton, en 1945, desarrolló un sistema para ordenar las redes de ríos. Ulteriormente, éste fue ligeramente modi-

ficado por Strahler en 1964, sistema que es conocido como Horton-Strahler y hasta hoy en día el método más comúnmente utilizado (Chow *et al.*, 1994). La figura 8 muestra el orden de las corrientes existentes en el CARL.

Por otro lado, Horton también introdujo el concepto de relación de bifurcación (Rb) para definir el cociente entre el número de cauces de cualquier orden (N_u) y el número de corrientes del siguiente orden superior

$$(N_{u+1}), \text{ con } Rb_u = \frac{N_u}{N_{u+1}}, \text{ y } \overline{Rb} = \frac{\sum_{i=1}^5 Rb_i (N_i + N_{i+1})}{\sum_{i=1}^5 (N_i + N_{i+1})}$$

	U (ORDEN)				
	1	2	3	4	5
N_u	1622	403	88	29	1
Rb_u	4.02	4.58	3.03	29	

De acuerdo con Campos (1992), las relaciones de bifurcación varían entre 3.0 y 5.0 para cuencas en las cuales las estructuras geológicas no distorsionan el modelo de drenaje. Para el caso particular del CARL, \overline{Rb} es 4.36.

b. Densidad de drenaje y densidad hidrográfica

La densidad de drenaje es un parámetro físico que refleja la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red hidrográfica y el tipo de escorrentía de la superficie. En general, es la relación entre la longitud de los canales de flujo y la superficie de la cuenca (Llamas, 1993).

Tradicionalmente, para el cálculo de la densidad de drenaje en el área de estudio, se procedía a la vectorización del mapa de la red hidrológica, a la generación de topología lineal para que de forma automática se generaran valores de longitud de cada segmento y a la adición, para luego proceder a la división de éstos entre la superficie de la cuenca.

Este proceso es bastante burdo por la generalización que hace, sobre todo si se considera toda la extensión territorial de la cuenca, pero la obtención de este parámetro por unidades más pequeñas y homogéneas puede realizarse a través del SIG, con el fin de llegar a un resultado más detallado (Lugo, 1991).

Al interior del CARL se elaboró una malla de 2 x 2 km. Los fluvios una vez vectorizados, se sobrepusieron topológicamente con las celdas; se aplicaron procesos de sumarización y se obtuvo para cada celda la longitud de

FIGURA 7. RED HIDROLÓGICA DEL CARL.

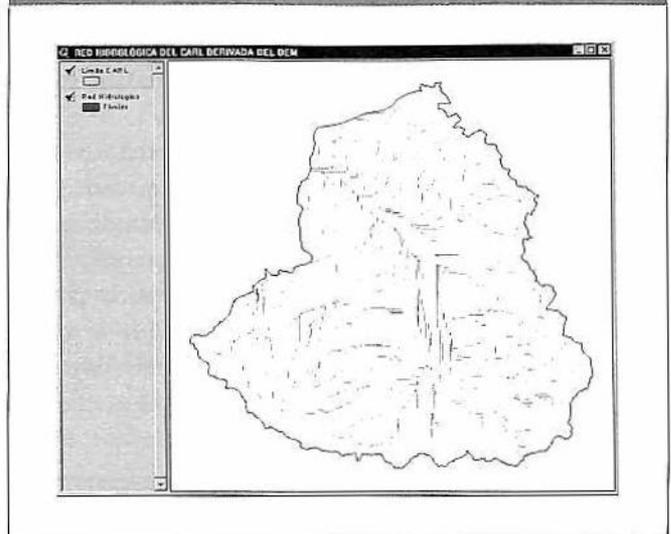
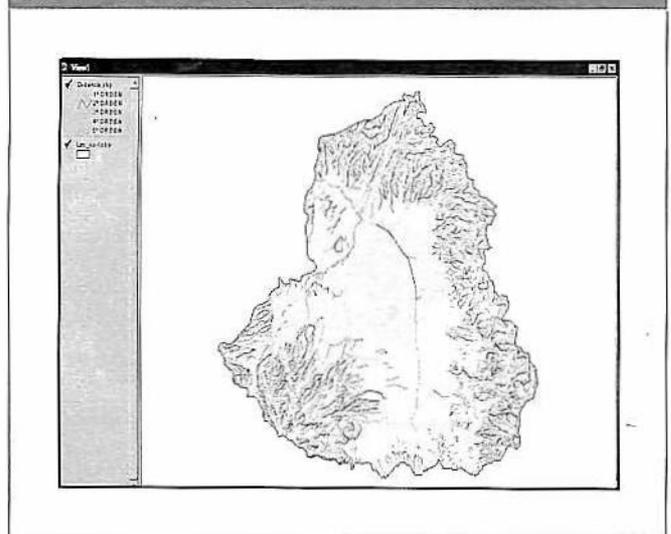


FIGURA 8. ORDEN DE LAS CORRIENTES DEL CARL.

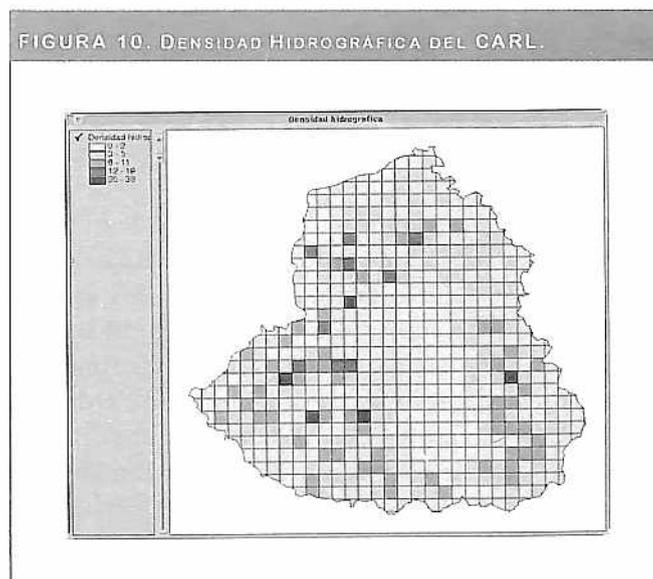
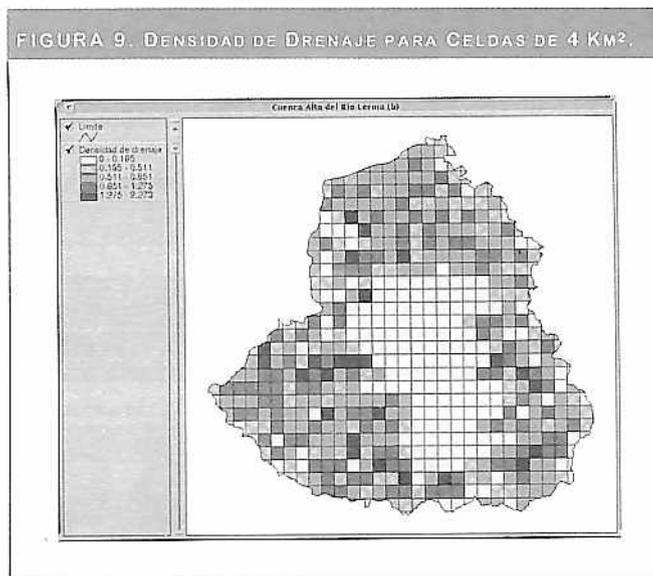


fluvios, dato que fue dividido por el área de cada celda (4 km²), lo que conformó el mapa de densidad de drenaje que se muestra en la figura 9.

Como es de esperar, si se observa la red hidrológica (figura 7), las áreas con una mayor densidad de drenaje corresponden a las ubicadas en las laderas de los sistemas montañosos de la cuenca. En las vertientes del nevado de Toluca y parte occidental de la sierra de las Cruces se presentan los valores más altos de densidad de drenaje (hasta 2.272 km/km²). Según Schumm (Llamas, 1993), el valor inverso de la densidad de drenaje, denominado constante, de estabilidad del río representa físicamente el número necesario de metros cuadrados para mantener las condiciones hidrológicas estables en un vector

hidrográfico de 1 metro de longitud. En el valle se obtuvieron valores de 0.0 al no haber información suficiente de la red de drenaje, ya que se requiere de un estudio más detallado y profundo para calcular los sistemas de drenaje urbano.

Por otro lado, la densidad hidrográfica representa el número de canales de flujo por unidad de superficie. Este parámetro debe interpretarse como el número de cauces por kilómetro cuadrado necesarios para mantener las condiciones de drenaje en la cuenca. Tres cauces por kilómetro cuadrado fue el valor promedio de la densidad hidrográfica del CARL. La figura 10 muestra la distribución espacial del valor de densidad hidrográfica.



4. Características del río principal

a. Longitud

El desarrollo longitudinal del colector principal es una magnitud característica útil y de efecto importante en la respuesta hidrológica de la cuenca, ya que en un río corto los efectos de la precipitación se reflejan más rápidamente que en un río largo (Klohn, 1970). La longitud del río principal es la distancia entre la desembocadura y el nacimiento del mismo.

En el caso del curso alto del río Lerma, el cual está considerado desde su nacimiento hasta la cortina de la presa José Antonio Alzate, la longitud es de 50.2 km.

b. Perfil longitudinal y pendiente media del río

El perfil longitudinal es un gráfico que representa las distintas elevaciones del fondo del río desde su nacimiento hasta la desembocadura de la cuenca. La forma del perfil varía entre lineal, exponencial o logarítmica. El vector que representa al colector principal es fácilmente ubicado y su longitud es un atributo básico. La longitud del río Lerma y su pendiente promedio al interior del CARL son respectivamente $L_{río} = 50.2$ km y $S_{río} = 0.11$ %.

c. Coeficientes de sinuosidad

Otras longitudes características del colector principal son las llamadas longitud del valle (L_v) y la longitud directa (L_d) (Llamas, 1993). Con la evaluación de los parámetros del río $L_{río}$, L_v y L_d se estiman los coeficientes de sinuosidad topográfica (S_t) e hidráulica (S_h) definidos por las ecuaciones siguientes.

$$S_t = \frac{L_{río}}{L_v} = \frac{50.2}{49.2} = 1.02 \quad S_h = \frac{L_{río}}{L_d} = \frac{50.2}{43.25} = 1.16$$

Los valores correspondientes de sinuosidad para el CARL son $S_t = 1.02$ y $S_h = 1.16$. De acuerdo con Campos (1992), se puede clasificar al río Lerma, dentro del curso alto, como cauce recto, pues su sinuosidad hidráulica es menor a 1.25 y la longitud del tramo es mayor de diez veces la sección transversal del cauce.

Conclusiones

Es importante resaltar que el uso de herramientas tales como los Sistemas de Información Geográfica y los Modelos de Elevación Digital de Terreno facilitan la tarea de la estimación de características fisiográficas de una cuenca. Por otro lado, estas herramientas permiten una

discretización tan detallada y precisa como la calidad de la información de base lo permita. Con el uso apropiado de esta tecnología digital, es posible realizar análisis con variación de criterios, y/o técnicas para reducir el tiempo de proceso. Igualmente, la cartografía digital generada sirve de base para otros estudios que tengan una ocurrencia espacial coincidente.

En la tabla 5, y de forma tabular, se resumen los resultados obtenidos en la estimación de las características fisiográficas del curso alto del río Lerma, donde para cada uno de los análisis efectuados se incluyen los comentarios pertinentes.

Complementariamente, es importante mencionar que la obtención de los parámetros fisiográficos del CARL

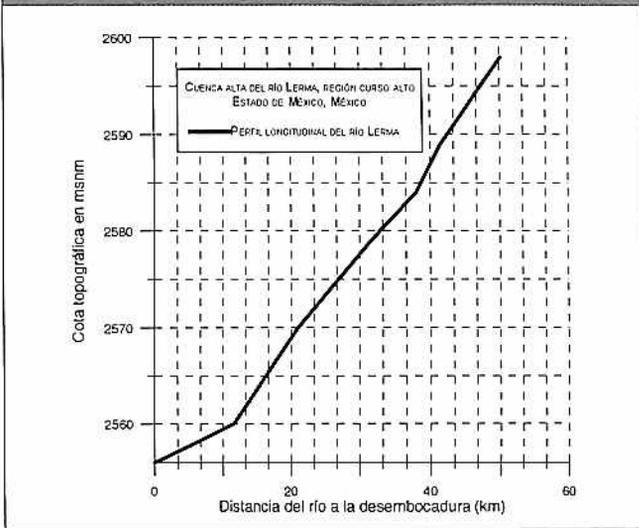
son de gran utilidad para el desarrollo de una modelación hidrológica que como proyecto de investigación, se está llevando a cabo en el Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Finalmente, como desventajas del uso de las herramientas digitales en los estudios hidrológicos, se pueden citar el alto costo que significa la aplicación de la tecnología SIG, ya que existe una relación directamente proporcional entre el costo de los *software* de SIG y su capacidad de análisis. Asimismo, se requiere personal capacitado para generar información apropiada, que dependiendo del área de estudio y resolución puede superar *n* veces el costo del *software*. Sin embargo, la generación de interfaces que

TABLA 5

CUENCA DEL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA		COMENTARIOS
SUPERFICIE Y PERÍMETRO	$A_{SD} = 2117.88 \text{ km}^2$ $A_{MAX} = 2116.76 \text{ km}^2$ $P_{SD} = 241.79 \text{ km}$ $P_{MAX} = 239.50 \text{ km}$	LA DIFERENCIA DE PRECISIÓN ENTRE LOS VALORES ENCONTRADOS BAJO TÉCNICAS DIGITAL Y MANUAL SON INFERIORES AL 5%. SIN EMBARGO, PARA LA TÉCNICA MANUAL HUBO DE UTILIZAR UNA MAYOR CANTIDAD DE TIEMPO Y HORAS HOMBRE. LA SUPERFICIE Y PERÍMETRO UTILIZADOS FUERON AQUELLOS OBTENIDOS CON EL USO DEL SIG Y MEDT.
COEFICIENTE DE COMPACIDAD	$K_c = 1.481$	EL VALOR EXTRAÍDO INDICA QUE LA CUENCA DEL CARL TIENDE A UN CUADRADO, ES DECIR QUE SU LARGO Y ANCHO SON VALORES CERCANOS.
RELACION DE CIRCULARIDAD	$R_c = 0.455$	ESTE COEFICIENTE CORROBORA LA CERCANÍA DE LA FORMA DE LA CUENCA DEL CARL CON UN CUADRADO.
RADIO DE ELONGACIÓN	$R_E = 1.07$	DE ACUERDO CON EL VALOR RESULTANTE SE INFIERE QUE LA CUENCA ES PREDOMINANTEMENTE PLANA, PERO CON PORCIONES ACCIDENTADAS.
CURVA HIPSOMÉTRICA Y ELEVACIONES CARACTERÍSTICAS	$H_{MAX} = 4549 \text{ MSNM}$ $\bar{H} = 2848 \text{ MSNM}$ $H_{MIN} = 2556 \text{ MSNM}$	DE ESTE ANÁLISIS SE INFIERE LA ALTITUD MÁXIMA, MEDIA Y MÍNIMA DE LA CUENCA. POR OTRO LADO, POR LA FORMA DE LA CURVA HIPSOMÉTRICA SE CONCLUYE QUE SE TRATA DE UNA CUENCA EROSIONADA Y CLASIFICADA COMO DE VALLE.
PENDIENTE DE LA CUENCA	$\bar{\alpha} = 4.88 \text{ GRADOS}$ $\bar{m} = 8.54\%$ $m_{min} = 0.00\%$ $m_{max} = 50.00\%$	EL ÁNGULO MEDIO DE INCLINACIÓN DE LA CUENCA ES DE 4.88°, CORRESPONDIENTE A UNA PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DE 8.54%. LAS PENDIENTES MÍNIMA Y MÁXIMA SON DE 0.00% Y DE 50.00%, RESPECTIVAMENTE. CON BASE EN EL ANÁLISIS POR RANGOS DE PENDIENTE, SE TIENE QUE EL 52.52% DE LA SUPERFICIE SE CLASIFICA DE SUAVE A LLANA, EL 30.15%, DE ACCIDENTADA A ACCIDENTADA MEDIA; 11.33% COMO FUERTEMENTE ACCIDENTADA Y EL 8% COMO TERRENO ESCARPADO.
ORIENTACIÓN DE LA CUENCA	PLANO: 23.17% N: 21.38%, E: 19.22% W: 20.44%, S: 15.79%	ESTE ANÁLISIS HA PERMITIDO IDENTIFICAR UNA DISTRIBUCIÓN CASI EQUILIBRADA DE ORIENTACIÓN DE PENDIENTES, FACTOR QUE INFLUYE EN EL ANÁLISIS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y DONDE LAS HORAS DE INSOLACIÓN SON CONSIDERADAS.
CARACTERÍSTICAS DEL DRENAJE DE LA CUENCA	$\bar{Rb} = 4.36$ ORDEN DEL RÍO LERMA: 5 (HORTON-STRAHLER)	LA GENERACIÓN DE DATOS RELATIVA AL DRENAJE DE LA CUENCA HA REQUERIDO EL USO DE INFORMACIÓN A ESCALA 1:50 000. EL VALOR DE LA RELACIÓN MEDIA DE BIFURCACIÓN DE LOS CAUCES ES DE $\bar{Rb} = 4.36$. CON EL VALOR OBTENIDO DE BIFURCACIÓN SE DICE QUE LA ESTRUCTURA GEOLÓGICA DE LA CUENCA NO DISTORSIONA EL MODELO DE DRENAJE. CON LA AYUDA DE LAS HERRAMIENTAS AQUÍ UTILIZADAS ES POSIBLE EXTRAER CON MAYOR DETALLE LA DISTRIBUCIÓN DE LA DENSIDAD DE DRENAJE, ASPECTO QUE DIFÍCILMENTE PUEDE SER LOGRADO MANUALMENTE. COMO ES DE ESPERAR, LAS ÁREAS CON MAYOR DENSIDAD DE DRENAJE SE UBICAN EN LAS VERTIENTES DEL NEVADO DE TOLUCA Y EN LA PARTE OCCIDENTAL DE LA SIERRA DE LAS CRUCES.
CARACTERÍSTICAS DEL RÍO PRINCIPAL	$L = 50.2 \text{ km}$ $S_{Río} = 0.11\%$ $S_r = 1.16$	EN EL CASO DEL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA, CONSIDERADO DESDE SU NACIMIENTO HASTA LA CORTINA DE LA PRESA J. A. ALZATE, EL CAUCE TIENE UNA LONGITUD DE 50.2 KMS Y UNA PENDIENTE PROMEDIO DE 0.11%. EL CAUCE PRESENTA UNA SINUOSIDAD HIDRÁULICA DE 1.16. PUESTO QUE EL VALOR DE LA SINUOSIDAD HIDRÁULICA ES MENOR QUE 1.25 Y QUE LA LONGITUD DEL TRAMO ES MAYOR DE DIEZ VECES LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CAUCE, SE DICE ESTAR EN PRESENCIA DE UN RÍO RECTO.

FIGURA 11. PERFIL LONGITUDINAL DEL RÍO LERMA DENTRO DEL CARL.



contengan las rutas críticas de procesos de *introducción, manipulación, análisis y salida* de los datos con fines hidrológicos, se vislumbran como medios ideales para una mayor productividad y facilidad en la aplicación de esta tecnología en la ingeniería hidráulica. 🏠



BIBLIOGRAFÍA

Cámara, C. (1992). *Evaluación de tierras con fines forestales, dentro de un sistema de información geográfica, estudio de caso: municipio de Amanalco*. Tesis Profesional, Facultad de Geografía, UAEM, Toluca, México.

Campos-Aranda, D. F. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. 2a. ed., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

Chow, V. T; Maidment, D. R, Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*, Mc Graw Hill, Bogotá, Colombia.

Díaz-Delgado, C.; K-M, Ba, Iturbe-Posadas, A.; Esteller, M. V. y García, J. A. (1998a). "SIG para el análisis geográfico-hidrológico del curso alto del río Lerma, Estado de México", en *Memorias del XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Oaxaca, México.

Díaz-Delgado, C.; Iturbe-Posadas, A.; K-M, Ba y Reyna-Saéñz, F. (1998b). "Calidad espacial y análisis territorial de datos climatológicos: el caso del Estado de México", en *Ciencia ergo sum*. Vol. 5. Num. 3, UAEM, Toluca, México.

dmark@sun.acsu.buffalo.edu (sin año)

Domínguez-Tejeda, E.; Iturbe-Posadas, A. y Reyna-Saéñz, F. (1998). *Sistema de información geográfica para el inventario y análisis de los recursos bióticos del estado de México*. Tesis profesional, Facultad de Geografía, UAEM, Toluca, México.

ESRI. (1992). *Cell-based Modeling with GRID 6.1*. Estados Unidos.

ESRI. (1992). *Surface Modeling with TIN*, 2a. ed., Estados Unidos.

Franco Maass, S.

_____ (1993). "Contradicciones actuales de la cartografía automatizada en México", en *Ciencia ergo sum*. Año 1, Vol. 1, UAEM, Toluca, México.

_____ (1998). *Metodología para la localización de centros integrales para la gestión de desechos industriales peligrosos. El caso del valle de Toluca*. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá de Henares, Alcalá de Henares, España.

Hetas, R. (1972). *Métodos prácticos para el estudio de aguas superficiales y subterráneas*. Publicación No. 85, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas, Madrid, España.

Hunsaker, C. T.; Nisbet, R.; Lam, D.; Browder, J.; Baker, W.; Turner, M. y Botkin, D. (1993). *Spatial Models of Ecological Systems and Processes: The Role of GIS, Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press.

Jenson S. K. y Domingue, J. O. (1988). "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis", en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 54, No. 11, Estados Unidos.

Klohn, W. (1970). *Magnitudes fisiográficas e índices morfométricos relacionados con la hidrología*. Publicación Aperiódica No.12 del Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología, Bogotá, Colombia.

Lopez-Blanco, J. y Villers-Ruiz, L. (1998). "Delimitación de unidades ambientales biofísicas aplicando un enfoque geomorfológico y SIG, para el ordenamiento territorial de Los Cabos, Baja California Sur", en *Geografía y Desarrollo*. No. 16, Vol. XXX, Instituto de Geografía, UNAM, México, D. F.

Lugo-Hubp, J. (1991). *Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)*. Instituto de Geografía, UNAM, México, D. F.

Llamas, J. (1993). *Hidrología general. Principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Quebec, Canadá.

Palacio Prieto, J.; López Blanco, J. y Ortos Pérez, M. (1991). "Evaluación geomorfología estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno", en *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*. No. 23, UNAM, México, D. F.

Tarboton D. G., Bras, R. L. y Rodríguez-Iturbe, J. (1991). "On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data", en *Hydrological Processes*. Vol. 5, Estados Unidos.

Vargas, Cuervo G. (1993). *Metodología para la cartografía de zonas de susceptibilidad a los deslizamientos a partir de sensores remotos y SIG*. Ministerio de Minas y Energía, Santa Fe de Bogotá, Colombia.