

ALGORITMOS PARA ESTIMAR CARACTERÍSTICAS FÍSICAS EN CUENCAS RURALES Y SU APLICACIÓN EN EL CALIBRADO DEL MÉTODO RACIONAL, EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA No. 12 PARCIAL (RÍO SANTIAGO)

ALGORITHMS USED TO ESTIMATE PHYSICAL PROPERTIES OF RURAL WATERSHEDS AND THEIR APPLICATION IN THE CALIBRATION OF THE RATIONAL METHODS, IN HYDROLOGICAL REGION No. 12 PARTIAL (SANTIAGO RIVER)

Sergio I. Martínez-Martínez¹, Daniel F. Campos-Aranda^{2*}

¹Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Dr. Jesús Díaz de León # 523. Barrio del Encino. 20240. Aguascalientes, Aguascalientes. (simartin@correo.uaa.mx). ²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Genaro Codina # 240. 78280. San Luis Potosí, San Luis Potosí. (campos_aranda@hotmail.com).

RESUMEN

Los procesos hidrológicos que generan las crecientes son bastante complejos, de manera que su modelación matemática requiere de información pluviográfica e hidrométrica que generalmente no está disponible en la mayoría de las cuencas. Los registros de gastos máximos anuales son los mejores datos para predecir estos eventos y para calibrar métodos de estimación que se puedan aplicar en cuencas similares, sobre todo en las que no están aforadas. Este trabajo comprende el procesamiento de dos tipos de datos. El primero se refiere al de información geográfica en su forma de modelos digitales de elevación (MDE) para obtener el parteaguas, el área de cuenca y las características físicas de su colector principal, incluyendo su selección. Este análisis concluye con la estimación del tiempo de concentración de cada una de las siete cuencas procesadas. El segundo procesamiento se basa en la información hidrométrica, pluviográfica y pluviométrica disponible en las siete cuencas, para identificar el coeficiente de escurrimiento del método Racional asociado con diferentes periodos de retorno. Con los resultados numéricos se desarrolla un método regional de estimación de crecientes en cuencas rurales sin aforos, con registros cortos o no confiables. Se muestra que las predicciones son bastante confiables, pues su error relativo por defecto es menor del 15 %. Este método aplica la fórmula Racional estimando el coeficiente de escurrimiento (C_{Tr}) con base en las relaciones (C_{Tr}/C_{10}) regionales medianas calibradas.

ABSTRACT

The hydrological processes that cause floods are very complex, such that their mathematical modeling requires pluviographic and hydrometric information that is generally not available in most watersheds. The records of maximum annual flows are the best data for predicting these events and for calibrating estimation methods that can be applied to similar watersheds, in particular those that have not been gauged. This study comprises processing two types of data. The first type refers to geographic information in the form of digital elevation models (DEM) to determine the watershed divide, watershed area and physical characteristics of its main channel, including its selection. This analysis concludes with the estimation of the concentration time of each of the seven watersheds that were processed. The second type is based on hydrometric, pluviographic and pluviometric information available in the seven watersheds to identify the Rational method runoff coefficient associated with different return periods. With the numerical results the regional flood estimation method was developed for ungauged rural watersheds or those with unreliable records over short periods. The predictions are shown to be quite reliable since its relative error by defect is below 15 %. This method applies the Rational formula estimating the runoff coefficient (C_{Tr}) based on regional median calibrated ratios (C_{Tr}/C_{10}).

Key words: GIS, DEM, *ArcHydro*, Rational method, runoff coefficients, regional flood estimation.

INTRODUCTION

In México, tropical cyclones and local rainstorms are phenomena that cause floods, or maximum flows, that cause flooding and damage to

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Noviembre, 2008. Aprobado: Mayo, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 393-408. 2010.

Palabras clave: SIG, MDE, *ArcHydro*, método Racional, coeficientes de escurrimiento, estimación regional de crecientes.

INTRODUCCIÓN

En México, los ciclones tropicales y las tormentas locales son fenómenos que originan crecientes o avenidas máximas, las cuales generan inundaciones y daños a la infraestructura de carreteras y de protección, como diques, rectificaciones, encauzamientos y todo tipo de presas de almacenamiento. Aunque se ha modelado matemáticamente y con éxito los procesos hidrológicos que generan las crecientes en cuencas rurales y urbanas, la información pluviográfica e hidrométrica conjunta requerida para tales análisis generalmente no está disponible en todas las cuencas aforadas. Por ello, los registros históricos de gastos máximos anuales son los mejores datos para predecir estos eventos, así como para calibrar métodos de estimación para aplicar en cuencas similares, incluso en aquellas que no están aforadas. Un procedimiento, quizás el más simple y difundido, es el método Racional.

Las técnicas de los análisis regionales conjuntan la información hidrométrica de una zona geográfica considerada homogénea hidrológicamente para obtener relaciones confiables válidas dentro de tal región. El desarrollo de las relaciones hidrológicas buscadas comienza con la evaluación de las características físicas de las cuencas con hidrometría y su aplicación en cuencas no aforadas se realiza con base en tales propiedades: área, longitud y pendiente promedio del cauce principal, desnivel total del mismo, etcétera.

Por tanto los objetivos básicos de este trabajo fueron: 1) la descripción detallada del procedimiento y del software desarrollado para esta investigación orientado a determinar las características físicas de las cuencas rurales, con los resultados obtenidos mediante el procesamiento de modelos digitales de elevación (MDE), usando el juego de herramientas *ArcHydro*, con base en las cuales se estimó su tiempo de concentración con fórmulas empíricas; 2) la calibración de los coeficientes de escurrimiento del método Racional, usando el análisis probabilístico de las respuestas de siete cuencas rurales de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago) y de la estimación de sus predicciones según el método Racional. Los

highways and protective infrastructure such as dikes, rectifications, watercourses and all types of reservoir dams. Although the hydrological processes that cause floods in rural and urban watersheds have been successfully modeled mathematically, the joint pluviographic and hydrometric information required for these analyses are generally not available in all of the gauged watersheds. For this reason, the historical records on maximum annual flows are the best data for predicting these events as well as for calibrating methods of estimation for their application in similar watersheds, even in those that have not been gauged. One of these procedures, perhaps the simplest and most widely known, is the Rational method.

The regional analysis techniques bring together hydrometric information of a geographic zone considered hydrologically homogeneous to obtain reliable, valid relationships within the region. The development of target hydrological relationships begins with the evaluation of the physical characteristics of hydrometrically gauged watersheds, and its application in ungauged watersheds is based on properties such as area, length and average slope of the main channel, and total rise, among others.

Therefore, the basic objectives of this study were: 1) the detailed description of the procedure and software developed for this research aimed to determine the physical characteristics of rural watersheds, parting from the results obtained by processing digital elevation models (DEM), using the *ArcHydro* tool set, on which basis concentration time was estimated with empirical formulas; 2) calibration of the Rational method runoff coefficients using the probabilistic analysis of the responses of seven rural watersheds of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River) and from the estimation of its predictions according to the Rational method. The numerical results were used to formulate a regional prediction method.

MATERIALS AND METHODS

Rational method and identification of its runoff coefficient

The Rational method formula is:

$$Q=0.278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

resultados numéricos se usaron para formular un método regional de predicción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método Racional e identificación de su coeficiente de escurrimiento

La fórmula del método Racional es:

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

donde, Q es el gasto máximo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C es el coeficiente de escurrimiento que es adimensional y equivalente al cociente del escurrimiento entre la lluvia; i es la intensidad de la lluvia (mm h^{-1}); A el área de cuenca (km^2). La intensidad de lluvia i se estimó con base en las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) que caracterizan la cuenca; su duración es igual al tiempo de concentración (T_c) de la cuenca y un periodo de retorno (T_r) que corresponde al adoptado para el gasto máximo estimado. Por tanto, el coeficiente de escurrimiento será:

$$C_{Tr} = \frac{Q_{Tr}}{0.278 \cdot i_{Tr}^{Tr} \cdot A} \quad (2)$$

El procedimiento para usar la ecuación anterior en la identificación del C_{Tr} en cuencas rurales ha sido descrito y aplicado por Témez (1991) y Campos (2008). En el método Racional la acción de la lluvia y del área de cuenca son tomados explícitamente; en cambio, los efectos de sus condiciones físicas se consideran indirectamente mediante el T_c y el valor de C .

Selección de cuencas

Se acepta (Campos, 2008) que en cuencas de hasta 500 mi^2 ($\approx 1300 \text{ km}^2$) es todavía muy probable que la lluvia originada por un fenómeno no ciclónico iguale la magnitud de las crecientes derivadas de las precipitaciones ciclónicas. Esto implica que en cuencas menores a dicha magnitud es probable que se cumplan las hipótesis básicas de método Racional: 1) intensidad de lluvia con duración igual al T_c , constante y uniforme a través de la cuenca; 2) la infiltración y otras pérdidas no se consideran de una manera física real, sino indirecta global en el coeficiente de escurrimiento; 3) efectos despreciables del almacenamiento del escurrimiento sobre el terreno y los cauces. En la columna 1 del Cuadro 1 se citan en orden progresivo de tamaños de cuenca (columna 4) de las siete estaciones hidrométricas usadas, cuyas cuencas varían de 97 a 857 km^2 .

where Q is the maximum discharge ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C is the runoff coefficient, which is adimensional and equivalent to the quotient of runoff over rainfall; i is rainfall intensity (mm h^{-1}); A is the watershed area (km^2). Rainfall intensity i was estimated based on Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves, which characterize the watershed; its duration is equal to the concentration time (T_c) of the watershed, and it has a return period (T_r) corresponding to that adopted for the estimated maximum discharge. Therefore, the runoff coefficient will be:

$$C_{Tr} = \frac{Q_{Tr}}{0.278 \cdot i_{Tr}^{Tr} \cdot A} \quad (2)$$

The procedure to use the above equation in the identification of C_{Tr} in rural watersheds has been described and applied by Témez (1991) and Campos (2008). In the Rational method the action of rainfall and of the watershed area are taken explicitly. In contrast, the effects of the watershed's physical conditions are considered indirectly through T_c and the value of C .

Watershed selection

It is accepted (Campos, 2008) that in watersheds of up to 500 mi^2 ($\approx 1300 \text{ km}^2$) it is still very probable that rain from a non-cyclonic phenomenon can equal the magnitude of the floods derived from cyclonic precipitation. This implies that in smaller watersheds it is likely that the basic hypotheses of the Rational method are met: 1) rainfall intensity with a duration equal to T_c , constant and uniform throughout the watershed; 2) infiltration and other losses are not considered in a physically real way, but indirectly and overall in the runoff coefficient; 3) negligible effects of runoff storage over the terrain and channels. In column 1 of Table 1 the seven gauging stations used in order of watershed size (column 4) are listed; their watershed vary from 97 to 857 km^2 .

Digital elevation model (DEM) determination and projection

Continuous variation of a property of the geographic environment can be represented with a raster, or grid. For example, grids of plant cover, precipitation, temperature or terrain elevation can be produced. A grid with square cells, more popular and more easily manipulated than the rectangular cells, which represents the spatial distribution of elevation of the terrain in a given geographic region, is known as a digital elevation model (DEM). In each cell a representative elevation is assigned to the area covered by the cell and is designated by Z .

Cuadro 1. Características físicas de las cuencas de las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago) y sus respectivas estaciones pluviométricas base utilizadas.
Table 1. Physical characteristics of the gauging station watersheds of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River) and the respective pluviometric base stations used.

Hidrométrica y pluviométrica	Clave	Periodo de registro (años)	Área de cuenca (km ²)		Lc [†] (km)	H [‡] (m)	Elev [§] _{máx} (m)	Elev _{mín} (m)	Sc ^b (adim.)	Tc [□] (h)	Núm. de segmentos
			BANDAS	Estimada							
1. San Juanico	12563	1972–1976 (5)	100	97.0	18.9	153	2000	1847	0.00808	4.0	16
San Juanico	14127	1962–1987 (25)									
2. Calerita	12585	1965–2002 (37)	284	284.9	46.6	607	2357	1750	0.01303	7.0	14
Calera	14025	1961–1991 (28)									
3. Huascato	12589	1965–1987 (23)	312	312.5	51.6	565	2227	1662	0.01095	8.0	15
Huascato	14070	1964–1991 (25)									
4. Agostadero	12355	1941–1978 (38)	354	353.4	50.9	330	2118	1788	0.00648	10.0	13
Agostadero	14004	1961–1987 (27)									
5. Valle de Gpe.	12371	1941–1987 (47)	394	394.6	39.1	250	2070	1820	0.00639	8.0	12
Valle de Gpe.	14159	1961–1987 (27)									
6. La Yerbabuena	12607	1965–1995 (30)	484	487.3	41.4	429	1999	1570	0.01036	7.0	11
La Yerbabuena	14090	1969–1991 (16)									
7. Cuixtla	12469	1951–2002 (51)	854	856.7	77.0	1357	2159	802	0.01762	9.0	27
Cuixtla	14038	1961–1991 (27)									

[†] Longitud del cauce principal; [‡] desnivel total del cauce principal; [§] elevación; ^b pendiente promedio del cauce principal; [□] tiempo de concentración \diamond [†] Length of the main channel; [‡] total difference in elevation of the main channel; [§] elevation; ^b average slope of the main channel; [□] concentration time.

Obtención y proyección de los modelos digitales de elevación (MDE)

La variación continua de alguna propiedad del medio geográfico se puede representar mediante un raster o malla. Por ejemplo, se pueden producir mallas de cobertura vegetal, precipitación, temperatura o elevación del terreno. Una malla de celdas cuadradas, más populares y fáciles de manipular que las rectangulares, que representa la distribución espacial de la elevación del terreno en una cierta región geográfica es conocida como MDE. En cada celda se asigna una elevación representativa del área cubierta por la celda y se designa por Z.

Los MDE con los cuales se definieron las cuencas que descargan a las siete estaciones hidrométricas (Cuadro 1) se obtuvieron en el sitio Web del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) <http://www.inegi.gob.mx/geo/default.aspx>. Estas mallas, que forman parte del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), fueron obtenidas por el INEGI con sus propias cartas topográficas 1:50000 y tienen un tamaño de celda de 30×30 m. Una vez adquiridos los MDE deben ser alimentados a una aplicación informática para manipularlos y se usó la aplicación *ArcGIS* Desktop 9.2 (ESRI, 2006). Originalmente los MDE vienen en coordenadas geográficas y deben ser proyectados a un plano. En los MDE del CEM, las unidades de Z están en metros, el datum que usa el INEGI es el ITRF92 época 1988, elipsoide GRS80. Entre

The DEMs, with which the watersheds that discharge at the seven gauging stations (Table 1) are defined, were obtained from the web site of the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) <http://www.inegi.gob.mx/geo/default.aspx>. These grids, which are part of the Mexican Continuous Elevations (MCE), were obtained by INEGI with its own 1:50000 topographic charts and have a cell size of 30×30 m. Once the DEMs are acquired, they should be fed into a program for manipulation; for this, the application *ArcGIS* Desktop 9.2 (ESRI, 2006) was used. Originally, the DEMs are in geographic coordinates and must be projected onto a plane. In the DEM of MCE, the Z units are in meters; the datum that INEGI uses is ITRF92 epoch 1988, ellipsoid GRS80. Among the multiple projections available, the Albers projection was selected because it preserves the areas. The list of parameters of the Albers projection used was the following: False East=500 000 m; False North=0 m; Central Meridian=-105 degrees; Standard Parallel 1=20 degrees; Standard Parallel 2=-20 degrees; Latitude of Origin=0 degrees.

DEM processing to obtain sub-watersheds and stream segments

Some *ArcHydro* tools (Maidment, 2002; ESRI, 2007) were used, and also *Tau-DEM* tools (Tarboton, 2005). In Table 2 it is shown a summary of the standard operations done with the

múltiples proyecciones disponibles se eligió la proyección Albers debido a que conserva las áreas. La lista de parámetros de la proyección Albers usada fue: Falso Este=500 000 m; Falso Norte=0 m; Meridiano Central=-105 grados; Paralelo Estándar 1=20 grados; Paralelo Estándar 2=-20 grados; Latitud de Origen=0 grados.

Procesamiento de los MDE para obtener subcuencas y segmentos de corriente

Se usaron algunas herramientas *ArcHydro* (Maidment, 2002; ESRI, 2007), pero también pueden usarse las herramientas *TauDEM* (Tarboton, 2005). En el Cuadro 2 se presenta un resumen de las operaciones estándar realizadas con los MDE proyectados; después se explica brevemente cada una. Los detalles del uso de las herramientas *ArcHydro*, instaladas en el programa *ArcMap* del paquete *ArcGIS Desktop* de ESRI®, se pueden consultar en ESRI (2007).

projected DEMs. Later, each will be explained briefly. The details of the use of the *ArcHydro* tools installed in the *ArcMap* program of the *ArcGIS Desktop* software of ESRI® can be consulted in ESRI (2007).

Processing to obtain the main channel

Processing to obtain sub-watersheds and stream segments was done interactively using a combination of *ArcHydro* and *ArcMap* tools, while later processing required developing an algorithm. This algorithm was implemented in a macro written in Visual Basic for Applications (VBA) run in Microsoft® Excel® 2002 software (MC, 2003). It requires three files: one table of sub-watershed attributes in dbf format (dBASE™ IV) (*Sub-watershed* table); a table of attributes of line segments of streams defined in three dimensions in dbf format (*3D line* table); one file in text format with the coordinates X, Y and Z of the points that make up each stream segment in three dimensions (text *CoorLin3D*). The two dbf files are part of the shapefiles created in *ArcMap*.

Cuadro 2. Resumen de las operaciones estándar necesarias para extraer las subcuencas y los segmentos de corriente de una cuenca en estudio usando un MDE.

Table 2. Summary of standard operations necessary to extract sub-watersheds and stream segments for a watershed under study using a DEM.

Núm.	Operación	Formato	Observación
1	Análisis topográficos	Malla	Se realiza cuando se requiere (necesita información adicional)
2	Reacondicionamiento del terreno	Malla	Se realiza sí se requiere (necesita clase de elementos de líneas de corriente).
3	Construcción de muros	Malla	Se realiza sí se requiere (necesita clase de elementos de muros).
4	Llenado de hoyos o depresiones	Malla	
5	Determinación de direcciones de flujo	Malla	
6	Acumulación de flujo	Malla	
7	Identificación de corrientes	Malla	
8	Identificación de segmentos de corrientes	Malla	
9	Identificación de subcuencas	Malla	
10	Creación de polígonos de subcuencas	Malla	Se guarda la clase de subcuencas en un archivo con formato shapefile.
11	Creación de segmentos de corriente	Malla	Se guarda la clase de segmentos de corriente en un archivo con formato shapefile.
12	Selección de los segmentos de corriente de la cuenca en estudio	Shapefile	
13	Selección y creación de las subcuencas de la cuenca en estudio	Shapefile	Si una o más subcuencas tocan el límite del MDE. Regresar a obtener un MDE con mayor extensión. Datos para el procesamiento posterior.
14	Creación de los segmentos de corriente en 2D de la cuenca en estudio	Shapefile	
15	Creación de los segmentos de corriente en 3D de la cuenca en estudio	Shapefile	Datos para el procesamiento posterior.
16	Extracción de las elevaciones de los segmentos de corriente en 3D de la cuenca en estudio	Texto	Datos para el procesamiento posterior.

Procesamiento para obtener el cauce principal

El procesamiento para obtener subcuencas y segmentos de corriente se hizo interactivamente usando una combinación de herramientas de *ArcHydro* y de *ArcMap*; pero el procesamiento posterior requirió desarrollar un algoritmo. Este algoritmo fue implementado en una macro escrita en Visual Basic para Aplicaciones (VBA) corriendo en el programa Microsoft® Excel® 2002 (MC, 2003). Requiere tres archivos: una tabla de atributos de subcuencas en formato dbf (dBASE™ IV) (tabla *Subcuencas*); una tabla de atributos de segmentos de líneas de corriente definidas en tres dimensiones en formato dbf (tabla *Lineas 3D*); un archivo en formato texto con las coordenadas X, Y y Z de los puntos que forman cada segmento de corriente en tres dimensiones (texto *CoorLin3D*). Los dos archivos dbf son parte de los shapefile creados en *ArcMap*. El procesamiento inicial de los tres archivos lleva a crear la tabla *Network*, donde hay un registro para cada segmento. La tabla *Network* está basada en la tabla de atributos del shapefile de segmentos de corriente de las herramientas *TauDEM* (Tarboton, 2005) y sus campos se describen en el Cuadro 3.

El algoritmo para crear la tabla *Network* consiste esencialmente en identificar para cada segmento de corriente sus características físicas y topológicas. Esto es, el desnivel entre su punto inicial (aguas arriba) y su punto final (aguas abajo), su longitud, los segmentos que están aguas arriba del mismo, el área de drenaje acumulada hasta su punto final, su orden, su magnitud y el nodo final de aguas abajo. Para obtener las propiedades

The initial processing of the three files leads to the creation of the *Network* table, where there is a record for each segment. The *Network* table is based on the table of attributes of the shapefile of stream segments of the *TauDEM* tools (Tarboton, 2005); its fields are described in Table 3.

The algorithm for creating the *Network* table consists essentially of identifying the physical and topological characteristics of each stream segment, that is, its rise from its initial point (upstream) and its final point (downstream), its length, number of segments that are upstream from the final point, the accumulated drainage area to its end point, its order, its magnitude and the final downstream node. To obtain the accumulated properties, we begin with segments that do not have tributary segments. Then, sequentially, we start processing the segments with tributaries, for which all of their properties have been determined until we reach the final downstream node.

The rows of the *Network* table can be processed in a second step to determine, for example, the quotients of stream bifurcation, of stream lengths, of areas, or as in this study, the main channel. The main channel is identified following the usual rules (Martínez, 2000); that is, we begin with the channel at the mouth and we progress upstream until we reach confluences which have a segment of a lesser stream order than that of the main channel and another equal to that of the main channel, and we continue along this last segment. However, when we arrive at a confluence of segments one order lower than the main channel, we continue to the segment with the largest drainage area. If, eventually, we arrive at a confluence

Cuadro 3. Campos de la tabla *Network*, utilizados para obtener varias propiedades físicas ligadas a los segmentos de corriente de la cuenca procesada.

Table 3. Fields of the *Network* table, used to obtain several physical properties linked to stream segments of the processed watershed.

Campo	Descripción
LinkNo	Código de identificación (Id) asignado al segmento. Igual al HydroID, asignado por las herramientas <i>ArcHydro</i> , del correspondiente segmento de 2 dimensiones.
DwsLink	Id del segmento aguas abajo.
UpsLink1	Id del primer segmento aguas arriba del segmento actual. Los segmentos que comienzan una corriente no tienen segmentos aguas arriba.
UpsLink2	Id del segundo segmento aguas arriba del segmento actual.
UpsLink3	Id de un posible tercer segmento aguas arriba del segmento actual. (Eventualmente se puede presentar cuando tres celdas de la malla de corrientes descargan en una celda que comienza un nuevo segmento. Esto puede suceder cuando el umbral para definir una corriente es demasiado bajo, relativamente cercano al área representada por una celda).
DwsNodeId	Id del nodo aguas abajo.
Order	Orden, según Strahler (1964), del segmento actual.
Length	Longitud del segmento actual, en metros.
Magnitude	Magnitud del segmento actual. La magnitud de un segmento se consideró igual a la suma de las magnitudes de sus dos (o tres) segmentos de aguas arriba más uno. Los segmentos iniciales no tienen segmentos aguas arriba, por lo que su magnitud es uno.
DwsContAr	Área tributaria hasta el extremo aguas abajo del segmento actual, en m ² .
Drop	Caída o desnivel entre el extremo aguas arriba y el extremo aguas abajo del segmento actual, en m.

acumuladas se inicia por los segmentos que no tienen segmentos tributarios. Luego, secuencialmente se procesan los segmentos a cuyos tributarios se ha determinado todas sus propiedades hasta llegar al nodo final de aguas abajo.

Los renglones de la tabla *Network* se pueden procesar en un segundo paso para determinar, por ejemplo, los cocientes de bifurcación de las corrientes, de longitudes de las corrientes, de áreas o, como en este trabajo, el cauce principal. El cauce principal se identificó siguiendo las reglas usuales (Martínez, 2000); esto es, se inicia por el cauce en la salida; se avanza aguas arriba, hasta llegar a confluencias que tengan un segmento de orden de corrientes menor al del cauce principal y otro igual al del cauce principal; y se sigue por este último. Sin embargo, cuando se llega a una confluencia de segmentos de orden de corriente menor en uno al del cauce principal, se sigue al segmento de mayor área. Si eventualmente se llega a una confluencia de segmentos de orden menor en uno al del cauce principal, y además éstos tienen la misma área drenada, entonces se escoge al segmento cuya red de drenaje esté más desarrollada: el que tenga una magnitud mayor. La macro *ProcNetArcHydro* desarrollada para implementar este algoritmo crea una hoja de cálculo llamada *Profile*, donde se da el número total de segmentos en la tabla *Network*. Luego, para cada red de drenaje o, equivalentemente, para cada cuenca presente en los datos, se crea una tabla con las columnas *i*, *LinkNo*, *UpsLink1*, *UpsLink2*, *UpsLink3*, *DsNodeId*, *Order*, *Length*, *Magnitude*, *DS_Cont_Ar* y *Drop*; y tantos renglones como segmentos de corriente formen parte de su cauce principal. La macro pide tres archivos de datos y uno de resultados. Para observar los resultados de la macro se puede abrir el archivo Excel que guarda el perfil. Este archivo tiene dos hojas, una llamada *Network* y la otra *Profile*; de la hoja *Profile* se puede extraer datos para hacer análisis geomorfológicos. La transformación de los datos para representar el perfil del cauce es directa. Finalmente, con los resultados obtenidos en Excel se puede volver a *ArcMap* para seleccionar los segmentos que forman el cauce principal de la cuenca estudiada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados del procesamiento de todas las cuencas

Como muestra, se presentan en las Figuras 1 y 2 los resultados obtenidos al aplicar los procedimientos explicados a la cuenca de la estación Valle de Guadalupe.

En la Figura 3 se muestra un mapa con la localización de las siete cuencas estudiadas y se indican los cauces principales. En todos los casos se aplicó

of segments one order lower than the main channel and these, in addition, have the same drainage area, then we select the segment whose drainage network is more developed: that which has a larger magnitude. The macro *ProcNetArcHydro* developed to implement this algorithm creates a spread sheet called *Profile*, in which the total number of segments is given in the *Network* table. Then, for every drainage network or, equivalently, for every watershed present in the data, a table is created with the columns *i*, *LinkNo*, *UpsLink1*, *UpsLink2*, *UpsLink3*, *DsNodeId*, *Order*, *Length*, *Magnitude*, *DS_Cont_Ar*, and *Drop*, and with as many rows as there are stream segments forming part of its main channel. The macro asks for three data files and one of results. To observe the results of the macro, the Excel file where the profile is saved can be opened. This file has two sheets, one called *Network* and the other *Profile*; from the *Profile* sheet data can be extracted to conduct geomorphological analyses. The transformation of the data to represent the channel profile is direct. Finally, with the results obtained in Excel we can return to *ArcMap* to select the segments that form the main channel of the watershed studied.

RESULTS AND DISCUSSION

Processing results for all of the watersheds

As an example, the results obtained by applying the explained procedures to the watershed of the Valle de Guadalupe station in Figures 1 and 2 are shown.

A map with the location of the seven watersheds studied is shown in Figure 3; the main channels are indicated. In all cases, a threshold was applied to begin streams equal to 1 % of the watershed area, except in the case of the Cuixtla watershed, whose size is double the order of the other watersheds, and thus 0.5 % of its area was used to define a drainage network with a density similar to that of the other watersheds.

The main channels originated in the part farthest from the mouth. Their downhill flow is sinuous with more or less brusque changes in direction, with the exception of the channel of the Agostadero station watershed. The elevations were obtained directly, on pit-filled DEMs, at initial and end points of the main channels. The summary of the results is shown in Table 1, in which their variations can be observed.

In the fourth and fifth columns of Table 1, similarity can be observed between the areas reported by BANDAS (IMTA, 2003) and those obtained in this study using DEMs, initially without the corresponding vector drainage networks. Therefore, if

i	Link No.	Longitud (m)	Altura (m)
0	-	39102.8	0
1	515	37798.0	0
2	532	35172.1	10
3	533	31018.6	20
4	538	28141.2	22
5	573	23985.4	110
6	587	21941.1	120
7	600	19031.9	140
8	610	17501.2	180
9	633	13645.4	180
10	673	6866.0	240
11	680	6058.5	250
12	730	0.0	250

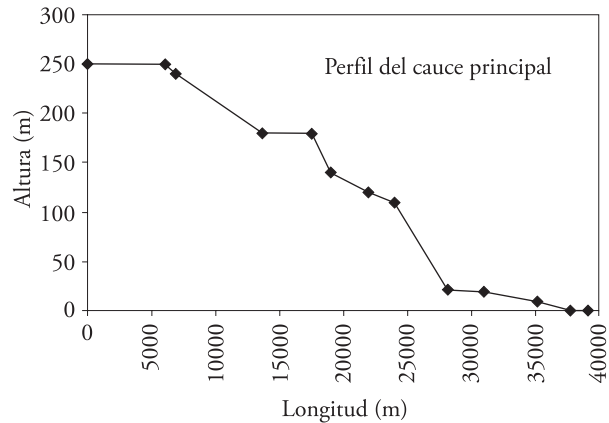


Figura 1. Ejemplo de un perfil de cauce principal (cuena Valle de Guadalupe, estado de Jalisco).
 Figure 1. Example of a main channel profile (Valle de Guadalupe watershed, state of Jalisco).

un umbral para comenzar corrientes igual al 1 % del área de la cuena, excepto en la cuena Cuixtla, cuyo tamaño es del orden del doble del de las otras cuenas; en ella se usó el 0.5 % de su área para definir una red de drenaje con densidad similar al de las otras cuenas.

Los cauces principales se originan en la parte más alejada de la salida. Su desarrollo en planta es tortuoso con cambios de dirección más o menos bruscos, a excepción del cauce de la cuena de la estación Agostadero. Las elevaciones se obtuvieron directamente, sobre los MDE rellenados, en los puntos de inicio y fin de los cauces principales. En el Cuadro 1 se muestra el resumen de los resultados, donde se pueden observar sus variaciones.

En las columnas cuarta y quinta del Cuadro 1 se observa semejanza entre las áreas reportadas por el BANDAS (IMTA, 2003) y las obtenidas en este trabajo usando MDEs, sin contar inicialmente con las correspondientes redes de drenaje vectoriales. Por tanto, si el error se cuantifica con las áreas, el valor absoluto máximo del error relativo cometido es 3.0 % que corresponde a la cuena San Juanico, mientras que en el resto es menor del 1 %.

Estimación del tiempo de concentración

Se usó una recopilación de fórmulas empíricas las cuales requieren las siguientes tres características físicas del colector principal: longitud (L_c) en km, desnivel total (H) en m y pendiente promedio (S_c). Algunas ecuaciones usan el área de la cuena (A) en km^2 . Entre las fórmulas empíricas usadas están las de Kirpich, Giandotti, Témez, etc., cuyos

the error is quantified with the areas, the maximum absolute value of the relative error committed is 3.0 %, corresponding to the San Juanico watershed, while in the rest of the watersheds it is less than 1%.

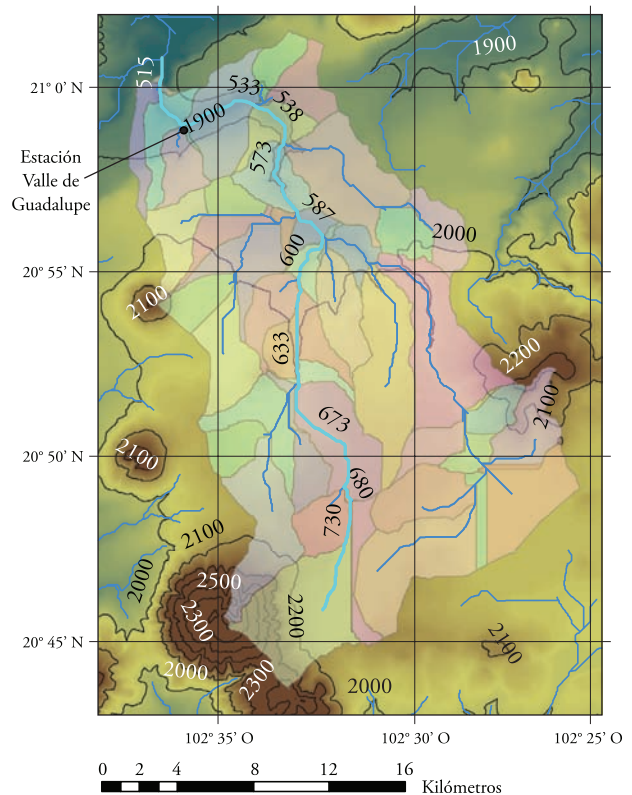


Figura 2. Cauce principal de la cuena Valle de Guadalupe, estado de Jalisco. (La cuena está representada sobre el MDE con hoyos rellenados y curvas de nivel).
 Figure 2. Main channel of the Valle de Guadalupe watershed, state of Jalisco. (The watershed is represented on DEM with filled in holes and contour curves).

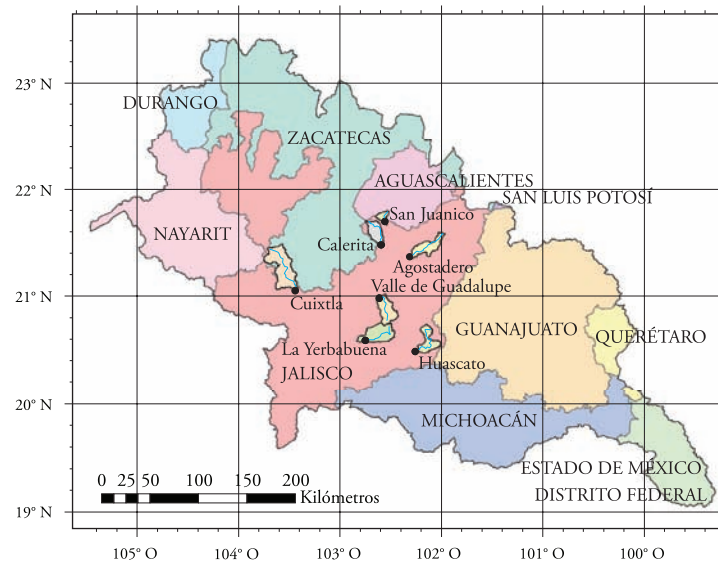


Figura 3. Localización de las siete cuencas en estudio.
Figure 3. Location of the seven watersheds under study.

resultados similares validan su aproximación. Los datos usados y los resultados adoptados se presentan en el Cuadro 1.

Información hidrométrica y su procesamiento

Las series de gastos máximos anuales correspondientes a las estaciones hidrométricas proceden del sistema BANDAS (IMTA, 2002) y se muestran en el Cuadro 4. Tomando en cuenta que las predicciones buscadas corresponden a periodos de retorno bajos (≤ 100 años), se espera que resulten muy semejantes y por ello se adoptaron los valores medianos obtenidos con la aplicación de cinco criterios del análisis probabilístico: las transformaciones MIMEMA y Potencial, y el ajuste de las distribuciones de probabilidades Log-Normal, Log-Pearson tipo III y General de Valores Extremos (Campos, 2006). Para ilustrar, en el Cuadro 5 se muestran los resultados para la estación hidrométrica Agostadero.

Información pluviométrica y su procesamiento

Del plano general de la región se seleccionaron las estaciones pluviométricas base para cada cuenca procesada, las más cercanas, que se citan en el Cuadro 1. Se obtuvo del sistema ERIC II (IMTA, 2000) sus series de lluvias máximas diarias anuales

Estimation of concentration time

A recompilation of empirical formulas was used; these required the following three physical characteristics of the main catchment: length (L_c) in km, total elevation difference (H) in m and average slope (S_c). Some equations use the watershed area (A) in km^2 . Among the empirical formulas used are those of Kirpich, Giandotti, Témez, etc., whose similar results validate their approximation. The data used and the results adopted are presented in Table 1.

Hydrometric information and its processing

The series of maximum annual discharges corresponding to the gauging stations come from the BANDAS system (IMTA, 2002) and are shown in Table 4. Considering that the target predictions correspond to shorter return periods (≤ 100 years), it is expected that they are very similar, and thus the values adopted were the median of the values obtained with the application of the following five probabilistic analysis criteria: MIMEMA and Potential transformations, and the fit of the Log-Normal, Log-Pearson type III and General Extreme Values probability distributions (Campos, 2006). To illustrate, the results for the Agostadero gauging station are shown in Table 5.

Cuadro 4. Gastos máximos anuales ($m^3 s^{-1}$) en las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago).**Table 4. Annual maximum flows ($m^3 s^{-1}$) at the indicated gauging stations of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River).**

Núm.	San Juanico	Calerita	Huascato	Agostadero	Valle de Guadalupe	La Yerbabuena	Cuixtla
1	11.0	65.5	320.0	132.4	235.0	92.3	53.5
2	11.1	104.0	150.9	66.9	40.9	78.1	347.0
3	76.0	103.4	158.8	75.4	82.8	91.7	176.2
4	53.2	98.5	256.4	72.3	114.2	168.6	197.7
5	5.5	0.6	94.9	44.4	44.7	31.8	470.0
6	2.9	35.7	214.6	56.9	54.7	74.5	259.0
7	4.1	69.8	262.4	150.0	79.0	135.2	189.4
8	11.4	26.6	126.9	97.5	62.5	44.8	465.1
9	18.6	318.5	444.2	111.2	40.5	168.7	306.0
10	1.9	2.8	133.5	78.5	76.5	117.0	269.0
11		28.6	194.1	73.6	49.3	164.1	470.5
12		114.1	251.5	75.7	48.6	181.0	408.0
13		70.3	142.5	65.8	24.0	165.1	305.8
14		46.6	59.5	21.7	19.1	109.0	123.5
15		18.4	109.0	88.6	69.1	89.4	409.0
16		3.8	94.0	52.3	66.2	144.9	222.5
17		0.3	145.8	25.3	1.8	110.5	1000.0
18		0.5	25.9	92.6	183.0	55.1	212.3
19		28.8	94.9	13.4	54.7	137.7	489.0
20		129.7	115.1	37.7	24.2	149.7	537.1
21		7.2	210.2	27.9	122.0	85.5	316.4
22		66.1	107.1	59.1	21.0	37.2	161.0
23		68.5	20.1	42.0	104.0	42.6	718.0
24		9.8		67.9	20.5	137.3	161.5
25		132.3		81.0	108.6	27.1	692.0
26		116.7		34.9	47.8	41.9	315.7
27		50.9		88.6	102.6	176.4	695.9
28		7.9		33.2	109.6	79.4	659.0
29		7.1		27.2	15.6	140.3	193.8
30		10.9		75.1	85.2	71.7	321.4
31		11.7		126.7	106.0		439.0
32		0.1		8.7	29.7		181.7
33		10.3		216.0	423.0		435.5
34		17.3		41.4	83.3		604.7
35		0.6		27.7	109.7		430.1
36		68.7		89.3	252.4		190.0
37		61.7		15.0	57.2		397.0
38				48.8	153.1		295.0
39					74.3		386.0
40					47.9		180.0
41					50.0		123.0
42					17.5		26.3
43					86.0		45.0
44					94.7		111.1
45					39.6		71.0
46					156.0		73.8
47					28.7		152.3
48							150.8
49							68.0
50							145.8
51							134.1

Cuadro 5. Predicciones ($m^3 s^{-1}$) estimadas y adoptadas en la estación hidrométrica Agostadero, estado de Jalisco.
Table 5. Estimated and adopted predictions ($m^3 s^{-1}$) in the Agostadero gauging station, state of Jalisco.

Método probabilístico aplicado	Periodos de retorno (T_r) en años					
	2	5	10	25	50	100
Transformación MIMEMA	57	100	130	162	183	239
Transformación Potencial	59	97	123	156	179	202
Distribución Log–Normal	55	97	131	181	222	268
Distribución Log–Pearson tipo III	58	95	121	155	181	207
Distribución General de Valores Extremos	60	97	122	155	180	205
Valor mediano	58	97	123	156	181	207

(Cuadro 6) y se procesaron de manera idéntica a los gastos máximos.

Estimación de la intensidad de diseño

El procedimiento usado para estimar la intensidad $i_{T_c}^{Tr}$ conjuga la información pluviográfica (SCT,

Pluviometric information and its processing

From the general map of the region, the base pluviometric stations, the closest, were selected for each processed watershed, which are listed in Table 1. From the ERIC II system (IMTA, 2000), the series of annual maximum daily rainfall (Table 6) were

Cuadro 6. Precipitaciones máximas diarias anuales (mm) en las estaciones pluviométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago).

Table 6. Annual maximum daily precipitation (mm) in the indicated pluviometric stations of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River).

Núm.	San Juanico	Calerita	Huascato	Agostadero	Valle de Guadalupe	La Yerbabuena	Cuixtla
1	42.9	39.0	50.0	90.0	36.2	66.5	56.0
2	57.5	42.5	60.0	87.0	64.0	47.5	65.0
3	26.7	40.0	66.5	47.0	55.0	48.5	38.9
4	70.0	43.0	88.4	51.2	33.0	64.5	46.0
5	32.0	58.0	52.2	53.4	50.7	37.5	69.1
6	51.7	69.0	46.7	27.2	46.0	57.5	70.8
7	60.2	70.0	57.7	69.3	54.7	70.0	85.5
8	49.5	46.0	49.5	64.0	39.0	58.5	64.5
9	46.4	80.3	42.2	53.2	52.7	38.5	45.0
10	50.7	56.0	59.0	54.9	72.0	60.5	65.5
11	52.0	59.0	54.5	64.0	43.5	74.5	68.3
12	47.5	68.0	50.0	68.7	48.4	40.0	45.5
13	115.4	67.0	60.2	69.0	60.0	65.0	77.5
14	52.9	49.0	76.5	58.0	33.0	48.5	35.0
15	40.2	40.0	40.5	31.2	41.0	40.0	56.0
16	34.5	63.0	19.5	48.2	48.5	66.0	74.1
17	38.5	100.0	67.0	56.5	59.4		57.0
18	24.0	45.0	45.5	71.1	84.8		47.2
19	70.5	40.0	60.0	31.2	36.0		47.7
20	80.0	31.0	61.7	24.5	77.4		44.9
21	53.0	40.0	68.4	20.0	56.5		65.9
22	24.0	40.0	53.0	31.2	35.9		56.0
23	40.0	46.0	65.1	20.0	110.5		50.5
24	50.0	42.0	63.5	37.5	64.5		55.5
25	45.0	25.0	39.4	44.2	49.4		61.0
26	39.0		49.5	81.5		61.2	
27	43.0		30.1	57.0		51.2	
28	90.0						

1990) con la pluviométrica disponibles (IMTA, 2000), mediante la fórmula de Chen:

$$i_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(t+b)^c} = \frac{\alpha_{Tr}}{(t+b)^c} \quad (3)$$

donde, a , b y c son parámetros función de R que es el cociente lluvia-duración; i_t^{Tr} es la intensidad buscada, en mm h^{-1} ; P_1^{10} es la precipitación en una hora y periodo de retorno (Tr) 10 años, en mm; t la duración, en minutos ($5 \leq t \leq 1440$); F es el cociente lluvia-frecuencia. Tanto R como F son adimensionales y con las expresiones siguientes:

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (4)$$

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (5)$$

El procedimiento detallado de aplicación de la fórmula de Chen para obtener las curvas IDF de la cuenca puede ser consultado en Campos (2008).

Resultados de la identificación del coeficiente de escurrimiento

Para la aplicación de la ecuación 2 las predicciones, como las mostradas en el Cuadro 5, son el numerador; su denominador se obtiene con base en las curvas IDF y el valor de A se obtiene del Cuadro 1. Los resultados se presentan en el Cuadro 7, en el cual además están las relaciones adimensionales C_{Tr}/C_{10} y los valores medianos adoptados para diseño, o magnitudes regionales.

En general, los resultados del Cuadro 7 son consistentes, lo cual se demuestra por su similitud, con excepción de los resultados encontrados en la estación hidrométrica La Yerbabuena, que resultaron extraordinariamente bajos en los periodos de retorno elevados.

Fórmulas empíricas para estimar el C_{10}

Con base en los resultados del Cuadro 7, primero se calibró una fórmula propuesta para el coeficiente de escurrimiento del método Racional de periodo de retorno 10 años, según el procedimiento mostrado por Campos (2008):

obtained and processed in the same way as maximum flows.

Estimation of design intensity

The procedure used to estimate intensity i_t^{Tr} conjugates the pluviographic information (SCT, 1990) with the available pluviometric information (IMTA, 2000) using the formula of Chen:

$$i_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(t+b)^c} = \frac{\alpha_{Tr}}{(t+b)^c} \quad (3)$$

where a , b and c are function parameters of R , which the rainfall-duration quotient; i_t^{Tr} is the sought intensity, in mm h^{-1} ; P_1^{10} is the precipitation in one hour and return period (Tr) of 10 years, in mm; t the duration, in minutes ($5 \leq t \leq 1440$); F is the rainfall-frequency quotient. Both R and F are adimensional and have the following expressions:

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (4)$$

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (5)$$

The detailed application procedure of the Chen formula to obtain IDF curves of the watershed can be consulted in Campos (2008).

Results of identification of runoff coefficient

For the application of equation 2 the predictions, such as those shown in Table 5, are the numerator; the denominator is obtained on the basis of the IDF curves, and the A value is obtained from Table 1. The results obtained are presented in Table 7, which also shows the adimensional ratios C_{Tr}/C_{10} and the median values adopted for the design, or regional magnitudes.

In general, the results in Table 7 are consistent, demonstrated by their similarity, with the exception of the results found for the gauging station La Yerbabuena, which were extraordinarily low in the longer return periods.

Cuadro 7. Coeficientes de escurrimiento calibrados en las cuencas de las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago).
Table 7. Calibrated runoff coefficients in the watersheds of the indicated gauging stations of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River).

No.	Estación hidrométrica	Coeficientes de escurrimiento	Periodos de retorno (Tr) en años					
			2	5	10	25	50	100
1	San Juanico	C_{Tr}	0.108	0.137	0.153	0.167	0.173	0.180
		$C_{Tr}/C10$	0.706	0.895	1.000	1.092	1.131	1.176
2	Calerita	C_{Tr}	m 0.061	0.131	0.172	0.216	0.242	0.265
		$C_{Tr}/C10$	m 0.355	m 0.762	1.000	M 1.256	M 1.407	M 1.541
3	Huascato	C_{Tr}	0.112	M 0.171	M 0.201	M 0.238	M 0.252	M 0.269
		$C_{Tr}/C10$	0.557	0.851	1.000	1.184	1.254	1.338
4	Agostadero	C_{Tr}	M 0.118	0.170	0.194	0.219	0.234	0.248
		$C_{Tr}/C10$	0.608	0.876	1.000	1.129	1.206	1.278
5	Valle de Gpe.	C_{Tr}	0.100	0.149	0.172	0.200	0.223	0.240
		$C_{Tr}/C10$	0.581	0.866	1.000	1.163	1.297	1.395
6	La Yerbabuena	C_{Tr}	0.078	m 0.090	m 0.092	m 0.091	m 0.087	m 0.084
		$C_{Tr}/C10$	M 0.848	M 0.978	1.000	m 0.989	m 0.946	m 0.913
7	Cuixtla	C_{Tr}	0.081	0.128	0.155	0.183	0.201	0.212
		$C_{Tr}/C10$	0.523	0.826	1.000	1.181	1.297	1.368
Valores medianos o regionales		C_{Tr}	0.100	0.137	0.172	0.200	0.223	0.240
		$C_{Tr}/C10$	0.581	0.866	1.000	1.163	1.254	1.338

m: valor mínimo; M: valor máximo ❖ m: minimum value; M: maximum value.

$$C_{10} = \frac{(P_d^{10} - P_o)(P_d^{10} + 28 \cdot P_o)}{(P_d^{10} + 11 \cdot P_o)^2} \tag{6}$$

donde, P_d^{10} es la precipitación diaria (mm) con periodo de retorno de 10 años y P_o es la precipitación que no produce escurrimiento, con la expresión siguiente, al usar seis ternas de datos, ya que se eliminó la estación La Yerbabuena:

$$P_o = -11.68234 - 0.58275 \cdot Tc + 0.72031 \cdot P_d^{10} \tag{7}$$

cuyo coeficiente de determinación fue 0.55, es decir bajo, pero con un error estándar de la estimación de sólo 2.5 mm, considerado bastante aproximado. Este tipo de resultados mejora con más datos (Campos, 2008).

Aplicación de los resultados regionales

Se puede llevar a cabo en cualquier cuenca no aforada de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago) con el procedimiento siguiente:

Empirical formulas for estimating C_{10}

Based on the results in Table 7, first a formula proposed for the Rational method runoff coefficient for a 10-year return period was calibrated following the procedure presented by Campos (2008):

$$C_{10} = \frac{(P_d^{10} - P_o)(P_d^{10} + 28 \cdot P_o)}{(P_d^{10} + 11 \cdot P_o)^2} \tag{6}$$

where P_d^{10} is the daily rainfall (mm) with a 10-year return period and P_o is the precipitation that does not produce runoff, with the following expression, when using six sets of data, since the La Yerbabuena station was eliminated:

$$P_o = -11.68234 - 0.58275 \cdot Tc + 0.72031 \cdot P_d^{10} \tag{7}$$

whose coefficient of determination was 0.55, which is low, but with a standard estimation error of only 2.5 mm, which is considered a close enough

Paso 1): se localiza y cuantifica su área de cuenca (A) en km^2 y su tiempo de concentración (T_c) en horas. Paso 2): se aplica el procedimiento propuesto por Campos (2008) para obtener las intensidades $i_{T_c}^{\text{Tr}}$ necesarias con base en la fórmula de Chen. Paso 3): se estima el C_{10} con las ecuaciones 7 y 6; con ese valor y las relaciones regionales o finales del Cuadro 4 se estiman los coeficientes de escurrimiento correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5, 25, 50 y 100 años. Paso 4): se aplica la ecuación 1 para obtener las predicciones buscadas.

La aplicación del procedimiento anterior en las siete estaciones hidrométricas distribuidas en el centro de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago), condujo a las predicciones regionales citadas en el Cuadro 8, en contraste con las predicciones locales u observadas con el registro histórico. Además, en el Cuadro 8 se muestran los errores relativos ($E.R.$) en las estaciones procesadas, definido como:

$$E.R. = \frac{Q_{reg}^{\text{Tr}} - Q_{loc}^{\text{Tr}}}{Q_{loc}^{\text{Tr}}} 100 \quad (8)$$

donde, el error relativo se expresa en porcentaje y presenta un valor negativo cuando el gasto del método regional (Q_{reg}^{Tr}) fue menor que la predicción local (Q_{loc}^{Tr}); en cambio, cuando conduzca a un valor positivo, indica lo contrario.

CONCLUSIONES

Los procedimientos para obtener de las subcuencas y redes de drenaje de las cuencas procesadas son práctica estándar en diversas oficinas, especialmente los pasos realizados con las herramientas *ArcHydro* hasta antes de la obtención de la red de drenaje en 3D. La parte novedosa es obtener el cauce principal mediante un procedimiento computacional desarrollado ex profeso, usando como entrada algunos resultados proporcionados por dichas herramientas (*ArcHydro* y *ArcMap*). El proceso es más rápido y da resultados que dependen menos del criterio del analista que los obtenidos de un mapa de papel o de un dibujo en un sistema CAD. Para obtener resultados satisfactorios, la calidad del MDE original debe ser buena, aun cuando incluya hoyos que se deban rellenar. Se ha encontrado que los MDE del INEGI son buenos. Además, debe contar con una red de

aproximación. This type of result improves with more data (Campos, 2008).

Application of regional results

Application of regional results can be carried out in any ungauged watershed of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River) with the following procedure:

Step 1): the watershed area (A) is delimited and quantified in km^2 and its concentration time (T_c) in h. Step 2): the procedure proposed by Campos (2008) is applied to obtain the necessary $i_{T_c}^{\text{Tr}}$ intensities based on the Chen formula. Step 3): C_{10} is estimated with equations 7 and 6; from this value and the regional, or final, ratios from Table 4, the runoff coefficients corresponding to return periods of 2, 5, 25, 50 and 100 years are estimated. Step 4): equation 1 is applied to obtain the target predictions.

The application of the above procedure in the seven gauging stations distributed in the center of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River) led to the regional predictions given in Table 8, contrasting the local or observed predictions with historical records. In addition, in Table 8 it is shown the relative errors ($E.R.$) in the processed stations, defined as:

$$E.R. = \frac{Q_{reg}^{\text{Tr}} - Q_{loc}^{\text{Tr}}}{Q_{loc}^{\text{Tr}}} 100 \quad (8)$$

where the relative error is expressed in percentage and has a negative value when the flow of the regional method (Q_{reg}^{Tr}) was lower than the local prediction (Q_{loc}^{Tr}); in contrast, when it leads to a positive value, it indicates the opposite.

CONCLUSIONS

Procedures for obtaining sub-watersheds and drainage networks of the processed watersheds are standard practice in many offices, especially the steps done with *ArcHydro* tools before obtaining 3D drainage networks. The novel part is obtaining the main channel using a computational procedure developed specifically for the purpose, using as input some results provided by these tools (*ArcHydro* and

Cuadro 8. Contraste entre predicciones locales y regionales ($m^3 s^{-1}$) y error relativo (E.R., %), en las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago).**Table 8. Contrast between local and regional predictions ($m^3 s^{-1}$) and relative error (E.R., %) in the indicated gauging stations of Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River).**

Estación hidrométrica Concepto	Periodos de retorno en años					
	2	5	10	25	50	100
1) San Juanico						
Predicción local	27	45	59	77	90	104
Predicción regional	23	44	60	84	102	121
Error Relativo (%)	-14.8	-2.2	1.7	9.1	13.3	16.3
2) Calerita						
Predicción local	30	85	132	199	252	307
Predicción regional	48	95	130	182	222	263
Error Relativo (%)	60.0	11.8	-1.5	-8.5	-11.9	-14.3
3) Huascato						
Predicción local	144	237	295	374	417	465
Predicción regional	134	216	264	329	372	416
Error Relativo (%)	-6.9	-8.9	-10.5	-12.0	-10.8	-10.5
4) Agostadero						
Predicción local	58	97	123	156	181	207
Predicción regional	53	92	118	154	181	208
Error Relativo (%)	-8.6	-5.2	-4.1	-1.3	0.0	0.5
5) Valle de Guadalupe						
Predicción local	63	125	171	239	302	362
Predicción regional	62	123	168	236	287	341
Error Relativo (%)	-1.6	-1.6	-1.8	-1.3	-5.0	-5.8
6) La Yerbabuena						
Predicción local	103	146	168	192	204	216
Predicción regional	131	237	311	418	497	580
Error Relativo (%)	27.2	62.3	85.1	117.7	143.6	168.5
7) Cuixtla						
Predicción local	265	461	593	758	880	976
Predicción regional	349	569	699	879	1002	1126
Error Relativo (%)	31.7	23.4	17.9	16.0	13.9	15.4
Máximo E. R. (%) negativo	-14.8	-8.9	-10.5	-12.0	-11.9	-14.3
Máximo E. R. (%) positivo	60.0	23.4	17.9	16.0	13.9	16.3

drenaje vectorial que pueda aplicarse al MDE antes de su procesamiento, lo cual redundará en una mejor modelación del terreno y por ende en una mejor determinación de la cuenca y del cauce principal. A la fecha, la macro *ProcNetArcHydro* no se ha implementado como herramienta dentro del programa *ArcMap*, o cualquier otro programa similar, de tal manera que permita la identificación del cauce principal sin tener que salir a otro programa para hacerla.

La uniformidad o consistencia numérica de los coeficientes de escurrimiento identificados del método Racional en la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago), concentrados en el Cuadro 7, muestran la aplicabilidad del procedimiento propuesto en

ArcMap). The process is faster and gives results that depend less on the analyst's criteria than those obtained from a paper map or from a drawing in a CAD system. To obtain satisfactory results, the quality of the original DEM must be good, even when it includes holes that have to be filled in. It has been found that the DEM from INEGI are good. Moreover, there must be a vector drainage network that can be applied to DEM before its processing, which will result in better modeling of the terrain and, consequently, in better delimitation of the watershed and its main channel. To date, the macro *ProcNetArcHydro* has not been implemented as a tool within the *ArcMap* software, or any other similar

cuenas rurales de hasta 900 km² en dicha zona geográfica. Su exactitud se puede verificar con base en los resultados del Cuadro 8. Se recomienda la aplicación del procedimiento expuesto para obtener sus relaciones regionales en otras zonas geográficas del país.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al árbitro y editor anónimos, sus comentarios y observaciones, las cuales al ser atendidas mejoraron bastante la descripción de la parte operativa del trabajo.

LITERATURA CITADA

- Campos A., D. F. 2006. Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos. Avances en Hidráulica 13. AMH-IMTA. México, D. F. 172 p.
- Campos A., D. F. 2008. Calibración del método Racional en ocho cuencas rurales menores de 1650 km² de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa). Agrocienca 42: 615-627.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2006. ArcGIS Desktop Help. Version 9.2. Redlands, California, U.S.A.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2007. *ArcHydro* for ArcGIS 9 (version 1.2). Redlands, California, U.S.A.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Eric II: Extractor Rápido de Información Climatológica 1920-1998. 1 CD. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2002. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). 8 CD. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos.
- Maidment, D. R. (ed). 2002. *ArcHydro: GIS for Water Resources*. Environmental Systems Research Institute Press. Redlands, California, U.S.A. 220 p.

program, in a way that would permit identification of the main channel without having to go to another program.

The numerical uniformity, or consistency, of the identified Rational method runoff coefficients in the Hydrological Region No. 12 Partial (Santiago River), concentrated in Table 7, shows the applicability of the proposed procedure in rural watersheds of up to 900 km² in this geographic zone. Its precision can be verified with the results shown in Table 8. Application of the described procedure is recommended for obtaining regional relationships in other geographic zones of the country.

—End of the english version—



- Martínez M., S. I. 2000. Geomorfología de la cuenca. *In*: Introducción a la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, Ags. pp: 27-57.
- MC (Microsoft Corporation). 2003. Ayuda en línea de Excel 2002. Seattle, Washington, U.S.A.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes). 1990. ISOYETAS de Intensidad-Duración-Frecuencia. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura. México, D. F. 495 p.
- Strahler, A. N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. *In*: Chow, V. T. (ed). Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, Inc. New York, U.S.A. pp: 4.39-4.76.
- Tarboton, D. G. 2005. TauDEM Tools, Help online (version 3.1). Utah State University. Utah, U.S.A.
- Témez P., J. R. 1991. Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España. Ingeniería Civil 82: 51-56. CEDEX. Madrid, España.