

CALIBRACIÓN DEL MÉTODO RACIONAL EN OCHO CUENCAS RURALES MENORES DE 1,650 km² DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA No. 10 (SINALOA), MÉXICO

CALIBRATION OF THE RATIONAL METHOD IN EIGHT RURAL WATERSHEDS UNDER 1,650 km² OF THE HYDROLOGICAL REGION No. 10 (SINALOA), MÉXICO

Daniel F. Campos-Aranda*

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Genero Codina # 240.
78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí. (campos_aranda@hotmail.com)

RESUMEN

Se destaca la importancia económica de la estimación de crecientes o avenidas de diseño en las cuencas rurales pequeñas y medianas, así como la gran complejidad involucrada en los procesos hidrológicos que las generan. Por ello, la calibración de cualquier método de predicción de crecientes, ayudará a su estimación más confiable. Se describe con detalle el método Racional y la estrategia necesaria para identificar su coeficiente de escurrimiento asociado al periodo de retorno, en ocho cuencas rurales de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), con resultados consistentes numéricamente. Los resultados numéricos son procesados para establecer un procedimiento o método regional de estimación de crecientes en cuencas rurales sin aforos o con registros cortos no recomendados para el análisis probabilístico, cuyas predicciones se consideran confiables. Por último, se formulan conclusiones que destacan la consistencia numérica y exactitud del método de estimación de crecientes desarrollado, y por consecuencia la importancia de este estudio.

Palabras clave: Coeficientes de escurrimiento, estimación regional de crecientes, gastos máximos anuales, lluvias máximas diarias anuales, método Racional.

INTRODUCCIÓN

Las crecientes o avenidas máximas resultan de la ocurrencia de lluvias de alta intensidad y corta duración, o de baja intensidad y larga duración, así como también del deshielo y fusión de nieves, la falla de presas o de sistemas de diques de protección, o bien de la combinación de las condiciones citadas. Deslizamientos de laderas, terremotos, rompimientos de glaciales, mareas altas y oleajes de tormentas y huracanes, pueden empeorar las condiciones de las crecientes (Pilgrim y Cordery, 1993).

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Junio, 2007. Aprobado: Junio, 2008

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 42: 615-627. 2008.

ABSTRACT

The economic importance of the estimation of floods or design flows in the small and medium sized rural watersheds is highlighted, along with the great complexity involved in the hydrological processes they generate. Therefore, the calibration of any method of flood prediction would be helpful in obtaining a more reliable estimation. A detailed description is made of the Rational method and the strategy necessary for identifying its runoff coefficient associated with the return period, in eight rural watersheds of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa), with numerically consistent results. The numerical results are processed to establish a regional procedure or method of runoff estimation in rural watersheds without gaging or with short records which are not recommended for probabilistic analysis, whose predictions are considered reliable. Finally, conclusions are made which underline the numerical consistence and accuracy of the developed flood estimation method, and thus the importance of the present study.

Key words: Runoff coefficients, regional flood estimation, annual maximum flows, annual maximum daily rainfall, Rational method.

INTRODUCTION

The floods or maximum flows result from the occurrence of high intensity rainfalls of short duration, or low intensity rainfall with long duration, as well as from thawing and snowmelt, the failure of dams or systems of protection dikes, or the combination of the abovementioned conditions. Landslides, earthquakes, breakup of glaciers, high tides and waves of storms and hurricanes, can worsen flood conditions (Pilgrim and Cordery, 1993).

The nature of the hydrological system that produces flooding, that is, the interaction of the atmosphere, the geology of the terrain, the geomorphology of the watershed, the soils and their vegetation and human activities, is so complex that its modeling can only provide approximate estimations. In every hydrological system, there is an interrelationship of

La naturaleza del sistema hidrológico que produce las crecientes, es decir, la interacción de la atmósfera, la geología del terreno, la geomorfología de la cuenca, los suelos y su vegetación y las actividades del hombre, es tan compleja que su modelación sólo puede proporcionar estimaciones aproximadas. En todo sistema hidrológico se conjugan o interrelacionan la entrada, el funcionamiento del sistema y su salida (Dooge, 1973):

$$y(t) = h(t) \psi x(t) \quad (1)$$

donde, ψ indica que la función de operación $h(t)$ y la función de entrada $x(t)$ son combinadas para producir la función de salida $y(t)$. Cuando se conocen dos de las tres funciones citadas, se puede obtener la desconocida. Si ésta es la salida el problema es de predicción; si la función buscada es el funcionamiento del sistema se llama calibración o identificación; si es la entrada el problema se conoce como detección.

La gran complejidad involucrada en la génesis de las crecientes origina que la mejor información que se puede obtener para hacer estimaciones de las crecientes en futuras, es la que procede de los registros sistemáticos e históricos de las avenidas. Al respecto, el uso de la información hidrométrica local sobre crecientes para calibrar de cualquier modelo o método de estimación, es un enfoque confiable y seguro para lograr estimaciones reales. Lo anterior se debe a que si una tormenta origina grandes crecientes en una región, en otra zona aparentemente similar puede producir sólo avenidas ordinarias (Pilgrim y Cordery, 1993).

La estimación del gasto máximo en cuencas rurales pequeñas y medianas es probablemente la aplicación más común de la hidrología de crecientes, además de su gran importancia económica. Tales estimaciones son necesarias para diseñar alcantarillas y puentes pequeños, rectificaciones, encauzamientos y otros trabajos de drenaje, así como diseñar vertedores de almacenamientos pequeños de aprovechamiento o control.

Para la estimación de crecientes en cuencas rurales se han propuesto fórmulas empíricas y diversos métodos basados en la relación lluvia-escurrimiento, denominados métodos hidrológicos. Quizás el más simple y conocido sea el método Racional, el cual se describe con detalle posteriormente.

El objetivo fundamental de este trabajo fue identificar de los coeficientes de escurrimiento para aplicar el método Racional en México, a partir del análisis probabilístico de las respuestas de ocho cuencas rurales de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), menores de 1,650 km² y de la estimación de sus probables tormentas de diseño, basadas en información

entrance, the functioning of the system, and its exit (Dooge, 1973):

$$y(t) = h(t) \psi x(t) \quad (1)$$

where ψ indicates that the function of operation $h(t)$ and the entrance function $x(t)$ are combined to produce the exit function $y(t)$. When two of the three abovementioned functions are known, the unknown function can be obtained. If the unknown is the exit function, the problem is of prediction; if the unknown function is the functioning of the system, it is called calibration or identification; if it is the entrance, the problem is known as detection.

The great complexity involved in the genesis of floods results in the fact that the best information that can be obtained for making estimations of floods in futures, is that which comes from the systematic and historical records of the maximum flows. To this respect, the use of the local hydrometric information of floods to calibrate any estimation method or model, is a safe and reliable focus for achieving real estimations. The above is due to the fact that if a storm causes large floods in one region, in another apparently similar zone it may produce only ordinary flooding (Pilgrim and Cordery, 1993).

The estimation of the maximum flow in small and medium rural watersheds is probably the most common application of flood hydrology, as well as its great economic importance. Such estimations are necessary for designing culverts and small bridges, rectifications, channeling and other drainage works, as well as designing spillways of small reservoirs for control or utilization.

For the estimation of floods in rural watersheds, empirical formulas and diverse methods have been proposed based on the rainfall-runoff relationship, called hydrological methods. Perhaps the most simple and well known is the Rational method, which is described in detail further on.

The fundamental objective of the present study was to identify the runoff coefficients to apply the Rational method in Mexico, from the probabilistic analysis of the responses of eight rural watersheds of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa), less than 1,650 km² and of the estimation of their probable design storms, based on pluviographic and pluviometric information, as well as the estimation of their concentration time. The processing of the identified runoff coefficients made it possible to establish a regional method, which was validated by making predictions in three gauged watersheds that had not been used in the previous calibration, due to the fact that their hydrometric data were not considered reliable.

pluviográfica y pluviométrica, así como en la estimación de su tiempo de concentración. El procesamiento de los coeficientes de escurrimiento identificados permitió establecer un método regional, el cual se validó realizando predicciones en tres cuencas aforadas no usadas en la calibración previa, debido a que sus datos hidrométricos fueron considerados poco confiables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción y bases teóricas del método Racional

La fórmula del método Racional es:

$$Q = FU \cdot C \cdot i \cdot A \quad (2)$$

donde, Q es el gasto máximo, C el coeficiente de escurrimiento que es adimensional y equivalente al cociente del escurrimiento entre la lluvia, i la intensidad de la lluvia y A el área de cuenca. Cuando se utilizaban las unidades del sistema inglés: $\text{ft}^3 \text{s}^{-1}$, in h^{-1} y acres para Q , i y A , el factor de unidades FU resultaba igual a 1.008 y se omite de la fórmula. En cambio en el sistema métrico con $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, mm h^{-1} y km^2 , FU es igual a 0.278, es decir el recíproco de 3.6.

La intensidad de lluvia (i) tiene una duración igual a la asignada a la tormenta de diseño, comúnmente el tiempo de concentración (T_c) y un periodo de retorno igual al seleccionado para el gasto máximo calculado. Lógicamente se estima con base en las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno, que caracterizan a las tormentas de la zona. El T_c es un concepto idealizado definido como el lapso que requiere una gota de agua, que cae en el punto más lejano de la cuenca, para alcanzar la salida de ésta. En esta definición la lejanía se refiere al mayor tiempo de viaje y no de distancia. Una definición mejor indica que es el tiempo desde que comenzó la lluvia en exceso hasta que todas las porciones de la cuenca de drenaje están contribuyendo simultáneamente al gasto en la salida (Pilgrim and Cordery, 1993).

La designación de método Racional se debe a su concepción teórica elemental, pues cuando una intensidad de lluvia i ocurre, durante un cierto lapso t , una parte a de cuenca contribuye con escurrimiento, la más cercana a su salida y en una proporción C de la lluvia. Al avanzar el tiempo t hasta llegar al T_c , a se convierte en A y se llega al gasto máximo $Q = C \cdot i \cdot A$. Se considera que para duraciones menores del T_c , el efecto en la reducción del área de cuenca es mayor que el debido al aumento en la intensidad de la lluvia.

El método Racional es una descripción muy simple del proceso lluvia-escurrimiento, en la cual los efectos de la lluvia y del área de cuenca son tomados explícitamente y los efectos de las condiciones físicas de la cuenca se toman en cuenta de manera indirecta a través del T_c y del valor de C . La infiltración y otras pérdidas no se consideran de una manera física real, sino indirecta global en el coeficiente de escurrimiento C . El almacenamiento temporal del escurrimiento sobre el terreno y en los cauces, así como las variaciones temporales y espaciales de la lluvia son ignoradas completamente,

MATERIALS AND METHODS

Description and theoretical bases of the Rational method

The formula of the Rational method is as follows:

$$Q = FU \cdot C \cdot i \cdot A \quad (2)$$

where Q is the maximum flow, C is the runoff coefficient which is adimensional and equivalent to the runoff quotient between the rainfall, i the intensity of the rainfall and A the area of the watershed. When the units of the English system were used: $\text{ft}^3 \text{s}^{-1}$, in h^{-1} and acres for Q , i and A , the factor of FU units was equal to 1.008 and then is omitted in the formula. On the other hand, in the metric system with $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, mm h^{-1} and km^2 , FU is equal to 0.278, that is, the reciprocal of 3.6.

Rainfall intensity (i) has a duration equal to that assigned to the design storm, commonly the time of concentration (T_c) and a return period equal to that selected for the calculated maximum flow. Logically, the estimation is made based on the curves Intensity-Duration-Return period, which characterize the storms of the zone. The T_c is an idealized concept defined as the lapse required by a drop of water, that falls at the farthest point of the watershed, to reach the exit of the watershed. In this definition, distance refers to the longest travel time and not of distance. A better definition indicates that it is the time from the start of the excess rainfall until all of the portions of the drainage basin are contributing simultaneously to the flow at the exit (Pilgrim and Cordery, 1993).

The designation of the Rational method is because of its elemental theoretical conception, given that when a rainfall intensity i occurs, during a certain lapse t , a part a of watershed contributes with runoff, the closest to its exit and in a proportion C of the rainfall. As time t advances until reaching T_c , a becomes A and maximum flow is reached $Q = C \cdot i \cdot A$. It is considered that for shorter durations of the T_c , the effect in the reduction of the area of the watershed is greater than that which is due to the increase in the rainfall intensity.

The Rational method is a very simple description of the rainfall-runoff process, in which the effects of the rainfall and of the area of the watershed are taken explicitly and the effects of the physical conditions of the watershed are taken into account indirectly through the T_c and the value of C . Infiltration and other losses are not considered in a real physical way, but as global indirect in the runoff coefficient C . The temporary storage of the runoff on the land and in the waterways, as well as the temporal and spatial variations of the rainfall are completely ignored; therefore the method is only valid when these effects are small (Pilgrim and Cordery, 1993).

Procedure for identifying the runoff coefficient

For this purpose, the formula of the Rational method is expressed more explicitly for a period of return T_r in years:

$$Q_{Tr} = FU \cdot C_{Tr} \cdot i_{Tr}^r \cdot A \quad (3)$$

por lo cual el método sólo es válido cuando tales efectos son pequeños (Pilgrim y Cordery, 1993).

Procedimiento para identificar el coeficiente de escurrimiento

Para este propósito la fórmula del método Racional se expresa más explícitamente para un periodo de retorno T_r en años:

$$Q_{Tr} = FU \cdot C_{Tr} \cdot i_{Tc}^{Tr} \cdot A \quad (3)$$

por lo cual:

$$C_{Tr} = \frac{Q_{Tr}}{FU \cdot i_{Tc}^{Tr} \cdot A} \quad (4)$$

El procedimiento para aplicar la ecuación 4 es:

- 1) En cada cuenca aforada seleccionada, se hace un análisis probabilístico de su registro de gastos máximos anuales, para obtener los valores del Q_{Tr} correspondientes a periodos de retorno (T_r) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- 2) Se estima el tiempo de concentración (T_c) de cada cuenca, usando fórmulas empíricas (Kirpich, Témez, Giandotti, etc.). De ser posible, contrastar los resultados de tales fórmulas contra valores observados en las cuencas de la región, para adoptar un criterio a seguir.
- 3) Para cada cuenca se estiman sus valores correspondientes de la intensidad de lluvia de diseño, con base en la información pluviográfica o pluviométrica disponible.
- 4) Teniendo como dato el área de cuenca (A) y los resultados de los pasos 1 y 3, se aplica la ecuación 4 para obtener los valores identificados de C_{Tr} en cada cuenca estudiada.
- 5) Se selecciona un valor base de C_{Tr} para relacionarlo con las características físicas y climáticas de las cuencas, o bien para formar mapas de curvas de isovalores a través de la región analizada. Los valores de C_2 o C_{10} son generalmente más convenientes porque presentan menor dispersión. Estos valores también pueden servir para obtener relaciones promedio [C_{Tr}/C_{10}] aplicables únicamente en la región estudiada.

Selección de cuencas

Según Morris (1982), en cuencas de hasta 500 mi² (≈1300 km²), es 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 tal magnitud se cumplen las hipótesis del método Racional. Sin embargo, en este estudio se aceptó como límite superior de las cuencas, los 1645 km² correspondientes a la estación hidrométrica Guamuchil, lo cual permite incorporar a la estación Choix. Lo aceptable o erróneo de tal consideración se manifestará mediante la consistencia numérica de los resultados obtenidos.

thus:

$$C_{Tr} = \frac{Q_{Tr}}{FU \cdot i_{Tc}^{Tr} \cdot A} \quad (4)$$

The procedure for the application of equation 4 is as follows:

- 1) In each selected watershed, a probabilistic analysis is made of its record of maximum annual flows, to obtain the values of Q_{Tr} corresponding to return periods (T_r) of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years.
- 2) An estimation is made of the time of concentration (T_c) of each watershed, using empirical formulas (Kirpich, Témez, Giandotti, etc.). If possible, the results of these formulas are contrasted with values observed in the watersheds of the region, to adopt a criterion to be followed.
- 3) For each watershed an estimation is made of their corresponding values of the design rainfall intensity, based on the pluviographic or pluviometric information available.
- 4) Having as data the area of the watershed (A) and the results of steps 1 and 3, equation 4 is applied to obtain the identified values of C_{Tr} in each watershed studied.
- 5) A base value of C_{Tr} is selected to be related to the physical and climatic characteristics of the watersheds, or to form maps of curves of isovalues through the region that is analyzed. The values of C_2 or C_{10} are generally more convenient because they present less dispersion. These values can also serve to obtain average relationships [C_{Tr}/C_{10}] applicable only in the region under study.

Selection of watersheds

Morris (1982) establishes that in watersheds of up to 500 mi² (≈1300 km²), it is very likely that the rainfall originated by a non-cyclonic phenomenon will equal the magnitude of the floods derived from the cyclonic precipitations. This implies that in watersheds inferior to this magnitude, that the hypotheses of the Rational method are satisfied. However, in this study the 1645 km² corresponding to the Guamuchil hydrometric station was accepted as upper limit of the watersheds, which allows the incorporation of the Choix station. The acceptable or erroneous nature of this consideration will be shown through the numerical consistency of the results obtained.

The 11 hydrometric stations whose information was used, are shown in Table 1 in ascending progressive order of sizes of watershed (column 4). Their geographic location (Figure 1) proceeds from the general plan of Hydrological Region No. 10 (SRH, 1975). The latitude and longitude of the gravity centers estimated for each watershed are shown in Table 1.

Estimation of the concentration time

Escalante (1999) presented the following physical characteristics of the watersheds of the 42 hydrometric stations of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa): 1) area of watershed (A) in km²; 2) length

En el Cuadro 1 se indican, en orden progresivo ascendente de tamaños de cuenca (columna 4), las 11 estaciones hidrométricas cuya información fue usada. Su localización geográfica (Figura 1) procede del plano general de la Región Hidrológica No. 10 (SRH, 1975). En el Cuadro 1 se presentan la latitud y longitud de los centros de gravedad estimados para cada cuenca.

Estimación del tiempo de concentración

Escalante (1999) presentó las siguientes características físicas de las cuencas de las 42 estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa): 1) área de cuenca (A) en km^2 ; 2) longitud del colector principal (L_c) en km; 3) pendiente promedio del colector principal (Sc), adimensional; 4) tiempo de concentración (T_c) en horas, estimado con base en la fórmula de Kirpich. En el Cuadro 1 se presentan valores de L_c y Sc de cada una de las 11 cuencas seleccionadas para este estudio.

Para la estimación del T_c se usó una recopilación de fórmulas empíricas (Campos, 2007) y algunas requieren el desnivel total (H) en metros del colector principal. En este caso, para obtener una estimación de ese valor no reportado por Escalante (1999), el desnivel (h) que origina la pendiente Sc al ser aplicada a la longitud L_c , se multiplicó por un factor correctivo (F_c):

$$H = F_c \cdot (1,000 \cdot L_c) \cdot Sc \quad (5)$$

El valor de F_c fue 1.90 que corresponde al promedio de los encontrados por Martínez (2000) y Campos (2007). Los valores de H estimados con la ecuación 5 y las magnitudes adoptadas para el T_c de las 11 cuencas seleccionadas (Cuadro 1) son muy similares a los obtenidos por Escalante (1999).

Información hidrométrica utilizada

Las 11 series de gastos máximos anuales, correspondientes a las estaciones hidrométricas procesadas, proceden del CD No. 1 del sistema BANDAS (IMTA, 2003). Una inspección somera de tales datos destaca que la serie de la estación hidrométrica Los Molinos es la más corta (sólo 18 años de registro) y sus valores máximos son muy reducidos comparados con los registros de las otras estaciones con menor área de cuenca. Los registros de las estaciones Pericos y Chico Ruiz muestran un predominio de valores de baja magnitud, lo cual seguramente se reflejará en predicciones reducidas en los periodos de retorno altos.

Información pluviométrica utilizada

Con base en el plano general de la Región Hidrológica No. 10 (SRH, 1975) se seleccionaron las estaciones pluviométricas base para cada cuenca seleccionada (Cuadro 1). La estación base debiera localizarse dentro de la cuenca, pero sólo ocurrió en la cuenca de Zopilote, de Badiraguato y de Guamuchil; las demás están cercanas o en el sitio de la estación hidrométrica. Para cada estación pluviométrica base se obtuvieron del sistema ERIC II (IMTA, 2000)

of the principal collector (L_c) in km; 3) average slope of the principal collector (Sc), adimensional; 4) time of concentration (T_c) in hours, estimated based on the formula of Kirpich. Values of L_c and Sc of each one of the 11 watersheds selected for this study are shown in Table 1.

For the estimation of the T_c , a recopilation of empirical formulas was used (Campos, 2007), and some require the total gradient (H) in meters of the principal collector. In this case, to obtain an estimation of this value not reported by Escalante (1999), the gradient (h) that originates the slope Sc when applied to the length L_c , was multiplied by a corrective factor (F_c):

$$H = F_c \cdot (1,000 \cdot L_c) \cdot Sc \quad (5)$$

The value of F_c was 1.90, which corresponds to the average of those found by Martínez (2000) and Campos (2007). The values of H estimated with equation 5 and the magnitudes adopted for the T_c of the 11 selected watersheds (Table 1) are very similar to those obtained by Escalante (1999).

Hydrometric information used

The 11 series of annual maximum flows, corresponding to the processed hydrometric stations, procede from CD No. 1 of the system BANDAS (IMTA, 2003). A quick inspection of these data reveals that the series of hydrometric station Los Molinos is the shortest (only 18 years of records) and their maximum values are very low compared with the records of other stations with a smaller watershed area. The records of the stations Pericos and Chico Ruiz show a predomination of values of low magnitude, which will certainly be reflected in reduced predictions in the high return periods.

Pluviometric information used

Based on the general plan of Hydrological Region No. 10 (SRH, 1975), the base pluviometric stations were selected for each selected watershed (Table 1). The base station should be found within the watershed, but this only occurred in the watershed of Zopilote, Badiraguato and Guamuchil; the rest are nearby or in the site of the hydrometric station. For each base pluviometric station, its general characteristics (Table 1) were obtained from the system ERIC II (IMTA, 2000) and its series of annual maximum daily rainfalls.

Probabilistic processing of the hydrometric information

Given that the necessary predictions do not correspond to very high return periods, it is to be expected that they will be very similar, and therefore it was accepted that the standard error of fitting of the applied method would not be considered, but rather the median values obtained with the application of five criteria of the probabilistic analysis would be adopted: 1) the transformation MIMEMA (Bethlahmy, 1977); 2) the potential transformation (Chander *et al.*, 1978); 3) the Log-Normal distribution (Stedinger *et al.*, 1993); 4) the type III Log-

Cuadro 1. Características físicas y de tormentas en las cuencas de las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa, México) y sus respectivas estaciones pluviométricas base utilizadas.

Table 1. Physical and storm characteristics in the watersheds of the hydrometric stations indicated in Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) Mexico and their respective base pluviometric stations used.

Hidrométrica y pluviométrica	Clave	Periodo de registro (años)	Área de cuenca A (km ²)	L_c (km)	S_c (adim.)	H (m)	T_c (h)	Centro de gravedad		P_{1h}^{10} (mm)	P_{1h}^{25} (mm)	P_{1h}^{50} (mm)	R_{prom}
								Latitud	Longitud				
1. Bamícori	10057	1951-1983 (33)	223	20.2	0.00490	188	5.0	26° 22'	108° 23'	63	75	81	0.470
<i>Bamícori</i>	25007	1961-1985 (25)						26° 21'	108° 29'				
2. Pericos	10086	1960-1992 (32)	270	31.0	0.00613	361	7.0	25° 12'	107° 37'	75	88	99	0.425
<i>Pericos</i>	25071	1962-1997 (36)						25° 05'	107° 41'				
3. La Tina	10078	1960-1984 (25)	275	30.3	0.00413	238	8.0	26° 11'	108° 31'	64	76	81	0.403
<i>La Tina</i>	25053	1961-1985 (25)						26° 13'	108° 36'				
4. El Bledal	10027	1937-1995 (59)	371	31.0	0.00799	471	5.0	24° 43'	107° 01'	82	98	106	0.495
<i>Sanalona</i>	25081	1961-1998 (38)						24° 48'	107° 09'				
5. Chico Ruiz	10090	1976-2002 (25)	391	-	-	-	8.0	25° 15'	107° 45'	71	83	90	0.477
<i>Pericos</i>	25071	1962-1997 (36)						25° 05'	107° 47'				
6. Los Molinos	10108	1958-1976 (18)	501	35.0	0.02159	1436	4.0	25° 45'	107° 16'	70	94	114	0.623
<i>Soyatita</i>	25092	1961-1990 (29)						25° 52'	107° 18'				
7. Zopilote	10034	1939-2001 (58)	666	68.0	0.00690	892	11.0	25° 58'	108° 13'	63	75	80	0.466
<i>La Vainilla</i>	25054	1961-1983 (23)						26° 04'	108° 16'				
8. El Quelite	10083	1960-2001 (34)	835	42.0	0.00579	462	8.0	23° 39'	106° 21'	67	76	82	0.353
<i>El Quelite</i>	25031	1961-1990 (30)						23° 30'	106° 30'				
9. Badiraguato	10079	1959-1999 (41)	1018	59.0	0.02118	2374	6.0	25° 36'	107° 31'	76	97	120	0.364
<i>Badiraguato</i>	25110	1961-1997 (36)						25° 22'	107° 32'				
<i>Surutato</i>	25093	1961-1985 (25)						25° 48'	107° 33'				
10. Choix	10066	1955-2002 (47)	1403	82.0	0.00234	365	18.0	26° 38'	108° 05'	61	73	81	0.544
<i>Choix</i>	25019	1961-1998 (38)						26° 44'	108° 20'				
11. Guamuchil	10031	1939-1971 (33)	1645	65.0	0.00698	862	10.0	25° 31'	107° 50'	68	82	90	0.559
<i>Mocorito</i>	25117	1961-1985 (25)						25° 29'	107° 55'				

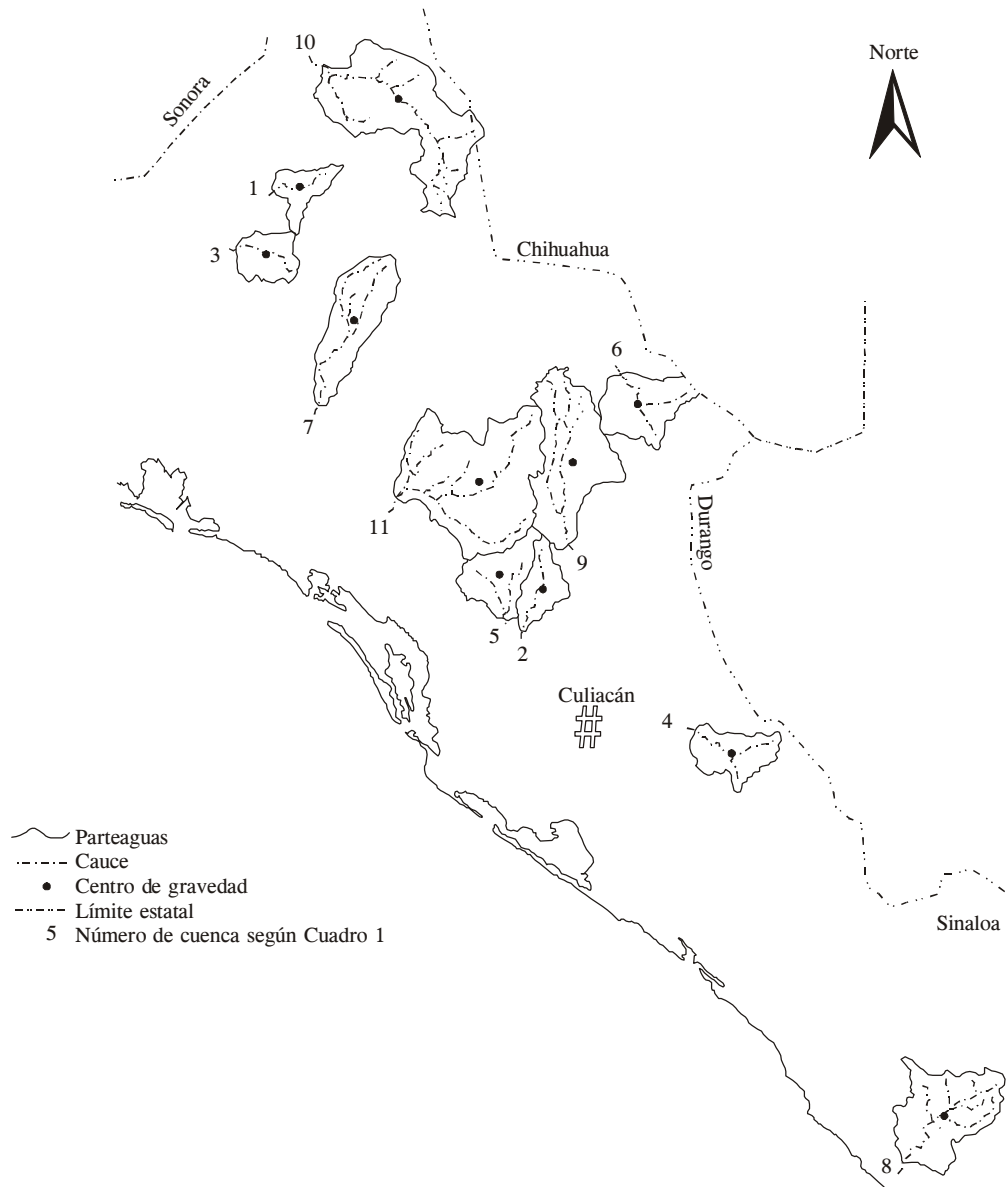


Figura 1. Localización geográfica de las 11 cuencas de las estaciones hidrométricas procesadas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa).
Figure 1. Geographic localization of the 11 hydrometric watersheds processed of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa).

sus características generales (Cuadro 1) y sus series de lluvias máximas diarias anuales.

Procesamiento probabilístico de la información hidrométrica

Dado que las predicciones necesarias no corresponden a periodos de retorno muy grandes, es de esperarse que resulten muy semejantes y por ello se aceptó no considerar el error estándar de ajuste del método aplicado, sino más bien adoptar los valores medianos obtenidos con la aplicación de cinco criterios del análisis probabilístico: 1) la transformación MIMEMA (Bethlahmy, 1977);

Pearson distribution (Bobée and Ashkar, 1991); 5) the GVE distribution (Stedinger *et al.*, 1993), also reported by Campos (2006).

Given that the necessary predictions do not correspond to very high return periods, it is to be expected that they will be very similar, and therefore it was accepted that the standard error of fitting of the applied method would not be considered, but rather the median values obtained with the application of five criteria of the probabilistic analysis would be adopted: 1) the transformation MIMEMA (Bethlahmy, 1977); 2) the potential transformation (Chander *et al.*, 1978); 3) the Log-Normal distribution (Stedinger *et al.*, 1993); 4) the type III Log-Pearson distribution (Bobée and Ashkar, 1991); 5) the GVE distribution (Stedinger *et al.*, 1993), also reported by Campos (2006).

2) la transformación potencial (Chander *et al.*, 1978); 3) la distribución Log-Normal (Stedinger *et al.*, 1993); 4) la distribución Log-Pearson tipo III (Bobée y Ashkar, 1991); 5) la distribución GVE (Stedinger *et al.*, 1993), reportadas también por Campos (2006).

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de los cinco procedimientos citados en los registros extremos procesados (Bamícori y Guamuchil). En el resto, por razones de espacio, se exponen sólo los valores medianos calculados para las predicciones buscadas (Q_{Tr}). El análisis conjunto de los valores del Cuadro 2 destaca que las predicciones en Los Molinos son bastante reducidas y no corresponden al tamaño de cuenca de tal hidrométrica.

The results of the five procedures cited in the processed extreme records (Bamícori and Guamuchil) are shown in Table 2. In the rest, for reasons of space, only the median values calculated for the desired predictions are shown (Q_{Tr}). The joint analysis of the values of Table 2 shows that the predictions in Los Molinos are quite reduced and do not correspond to the size of watershed of such hydrometric station.

Probabilistic processing of the pluviometric information

The records of annual maximum daily rainfalls were processed probabilistically, in a manner identical to the records of maximum flows, and their results are shown in Table 3.

Cuadro 2. Predicciones de gasto máximo ($m^3 s^{-1}$) estimadas y adoptadas en las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México.

Table 2. Predictions of maximum flow ($m^3 s^{-1}$) estimated and adopted in the indicated hydrometric stations of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa), Mexico.

Nombre estación hidrométrica Método de ajuste aplicado	EEA [†] ($m^3 s^{-1}$)	Periodos de retorno en años					
		2	5	10	25	50	100
1) <i>Bamícori</i>							
Transformación MIMEMA	35.3	115	318	444	578	665	743
Transformación Potencial	48.1	126	276	417	651	871	1132
Distribución Log-Normal	46.8	127	273	407	624	823	1054
Distribución Log-Pearson tipo III	46.5	126	275	416	649	866	1123
Distribución GVE [¶]	52.3	134	270	391	591	783	1020
Valores medianos [§]	46.8	126	275	416	624	823	1054
2) <i>Pericos</i>							
Valores medianos [§]	27.4	210	354	464	616	741	872
Predicciones del método Racional	-	84	243	393	633	848	1110
3) <i>La Tina</i>							
Valores medianos [§]	83.2	66	173	267	415	548	712
4) <i>El Bledal</i>							
Valores medianos [§]	63.4	206	404	575	837	1067	1325
5) <i>Chico Ruíz</i>							
Valores medianos [§]	58.7	170	356	497	676	816	958
Predicciones del método Racional	-	91	266	430	693	928	1216
6) <i>Los Molinos</i>							
Valores medianos [§]	15.6	122	195	239	286	315	342
Predicciones del método Racional	-	436	769	1,039	1445	1796	2225
7) <i>Zopilote</i>							
Valores medianos [§]	43.9	279	553	728	967	1079	1194
8) <i>El Quelite</i>							
Valores medianos [§]	84.2	330	701	1,026	1497	1906	2360
9) <i>Badiraguato</i>							
Valores medianos [§]	832.4	506	1181	1,980	3702	5846	8515
10) <i>Choix</i>							
Valores medianos [§]	97.6	226	422	608	939	1262	1590
11) <i>Guamuchil</i>							
Transformación MIMEMA	239.6	405	1138	1681	2260	2634	2970
Transformación Potencial	288.1	473	927	1322	1935	2479	3102
Distribución Log-Normal	260.3	476	919	1296	1870	2370	2933
Distribución Log-Pearson tipo III	240.3	470	954	1369	1993	2527	3119
Distribución GVE [¶]	244.5	461	869	1254	1927	2609	3492
Valores medianos [§]	244.5	470	927	1322	1935	2527	3102

[†] Error estándar de ajuste.

[¶] General de valores extremos.

[§] De las predicciones de los métodos de ajuste aplicados.

Procesamiento probabilístico de la información pluviométrica

Los registros de lluvias máximas diarias anuales se procesaron probabilísticamente de manera idéntica a los registros de gastos máximos y sus resultados se presentan en el Cuadro 3.

Estimación de la intensidad de diseño

El procedimiento propuesto (Campos, 2000) para estimar la intensidad i_{TC}^* usa los mapas de curvas isoyetas disponibles para los Estados en México (SCT, 1990), en duraciones de 10, 30, 60, 120 y 240 min y periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Además se usa la información pluviométrica disponible en la forma de precipitación máxima diaria anual (P_D), conocida en la Comisión Nacional del Agua (IMTA, 2000) como precipitación máxima en 24 h (P_{24}).

The procedure proposed (Campos, 2000) for estimating the intensity uses the maps of isoyet curves available for the States in Mexico (SCT, 1990), in durations of 10, 30, 60, 120 and 240 min and return periods of 10, 25 and 50 years. In addition, the available pluviometric information is used in the form of annual maximum daily rainfall (P_D), known in the Comisión Nacional de Agua (IMTA, 2000) as maximum rainfall in 24 h (P_{24}).

On pages 385, 390 and 395 of SCT (1990) are found the maps of isoyets of Sinaloa corresponding to the intensity in 60 min and return periods of 10, 25 and 50 years, that is, P_1^{10} , P_1^{25} and P_1^{50} . The values of the rainfalls of 1 h duration and return periods of 10, 25 and 50 years (of the cited maps) corresponding to the centers of gravity of each watershed are shown in Table 1.

The procedure consists of probabilistically analyzing the available record of P_D to obtain the rainfalls associated with return periods of 10, 25, 50 and 100 years, which when multiplied by

Cuadro 3. Predicciones de lluvia diaria (mm) estimadas y adoptadas en las estaciones pluviométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México.

Table 3. Predictions of daily rainfall (mm) estimated and adopted in the indicated pluviometric stations of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa), Mexico.

Nombre estación pluviométrica Método de ajuste aplicado	EEA [†] (mm)	Periodos de retorno en años					
		2	5	10	25	50	100
1) <i>Bamícori</i>							
Transformación MIMEMA	11.2	68	99	124	151	168	184
Transformación Potencial	14.1	72	91	107	134	160	198
Distribución Log-Normal	13.0	72	93	110	133	151	171
Distribución Log-Pearson tipo III	11.0	69	91	110	143	173	211
Distribución GVE [¶]	11.5	71	92	110	139	168	202
Valores medianos [§]	11.5	71	92	110	139	168	198
2) <i>Pericos</i>							
Valores medianos [§]	21.5	75	111	139	186	231	271
3) <i>La Tina</i>							
Valores medianos [§]	8.9	73	104	129	166	196	231
4) <i>Sanalona</i>							
Valores medianos [§]	8.2	82	114	138	174	204	239
5) <i>Soyatita</i>							
Valores medianos [§]	4.6	71	95	111	132	148	164
6) <i>La Vainilla</i>							
Valores medianos [§]	5.3	84	107	121	140	153	167
7) <i>El Quelite</i>							
Valores medianos [§]	8.2	84	121	151	193	229	270
8) <i>Badiraguato</i>							
Valores medianos [§]	22.4	91	126	153	196	236	273
9) <i>Surutato</i>							
Valores medianos [§]	22.5	105	158	204	285	359	459
10) <i>Choix</i>							
Valores medianos [§]	5.8	64	84	99	118	133	149
11) <i>Mocorito</i>							
Transformación MIMEMA	5.3	78	101	113	126	134	141
Transformación Potencial	5.7	77	100	113	127	137	146
Distribución Log-Normal	5.2	75	100	116	137	152	167
Distribución Log-Pearson tipo III	5.5	77	100	113	128	138	147
Distribución GVE	5.2	76	100	114	131	142	153
Valores medianos [§]	5.3	77	100	113	128	138	147

[†] Error estándar de ajuste.

[¶] General de valores extremos.

[§] De las predicciones de los métodos de ajuste aplicados.

En las páginas 385, 390 y 395 de SCT (1990) están los mapas de isoyetas de Sinaloa correspondientes a la intensidad en 60 min y periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, es decir, P_1^{10} , P_1^{25} y P_1^{50} . En el Cuadro 1 se presentan los valores de las lluvias de 1 h de duración y periodos de retorno 10, 25 y 50 años (de los mapas citados), correspondientes a los centros de gravedad de cada cuenca.

El procedimiento consiste en analizar probabilísticamente el registro disponible de P_D para obtener las lluvias asociadas a periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, que al ser multiplicadas por 1.13 (Weiss, 1964) se convierten en P_{24}^{Tr} , con las cuales se obtienen los cocientes R y F necesarios para aplicar la fórmula de Chen (1983):

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (6)$$

$$R = \frac{P_1^{100}}{P_{24}^{100}} \quad (7)$$

Con el valor promedio de los tres cocientes R que se pueden evaluar para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años (última columna del Cuadro 1), se obtienen los parámetros a , b y c de la fórmula de Chen con las expresiones siguientes (Campos, 2000), cuando $R \leq 0.60$:

$$a = -2.297536 + 100.0389 \cdot R - 432.5438 \cdot R^2 + 1256.228 \cdot R^3 - 1028.902 \cdot R^4 \quad (8)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 \cdot R - 341.4349 \cdot R^2 + 757.9172 \cdot R^3 - 598.7461 \cdot R^4 \quad (9)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294 \cdot R - 16.08111 \cdot R^2 + 29.09596 \cdot R^3 - 20.06288 \cdot R^4 \quad (10)$$

La fórmula de Chen es:

$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})t}{60(t+b)^c} \quad (11)$$

con P_t^{Tr} y P_1^{10} en mm, t en min ($5 \leq t \leq 1440$) y Tr ($2 \leq Tr \leq 100$) en años. Haciendo $t = Tc$, se calcula P_t^{Tr} el cual se transforma a intensidad en $mm \ h^{-1}$, para obtener la intensidad buscada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación del coeficiente de escurrimiento

Con base en los datos del Cuadro 1, los resultados del Cuadro 2 y de la aplicación de la ecuación 11, se obtuvieron por medio de la ecuación 4 los valores del coeficiente de escurrimiento identificado, asociado a cada periodo de retorno analizado. Los resultados considerados consistentes se presentan en el Cuadro 4, junto con los valores de las relaciones C_{Tr}/C_{10} y de los valores medianos adoptados para diseño, o magnitudes regionales.

1.13 (Weiss, 1964) are converted to P_{24}^{Tr} , with which the quotients R and F necessary for the application of the Chen formula (1983) are obtained:

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (6)$$

$$R = \frac{P_1^{100}}{P_{24}^{100}} \quad (7)$$

With the average value of the three quotients R which can be evaluated for the return periods of 10, 25 and 50 years (last columns of Table 1), the parameters a , b and c are obtained of the Chen formula with the following expressions (Campos, 2000), when $R \leq 0.60$:

$$a = -2.297536 + 100.0389 \cdot R - 432.5438 \cdot R^2 + 1256.228 \cdot R^3 - 1028.902 \cdot R^4 \quad (8)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 \cdot R - 341.4349 \cdot R^2 + 757.9172 \cdot R^3 - 598.7461 \cdot R^4 \quad (9)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294 \cdot R - 16.08111 \cdot R^2 + 29.09596 \cdot R^3 - 20.06288 \cdot R^4 \quad (10)$$

The formula of Chen is:

$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})t}{60(t+b)^c} \quad (11)$$

with P_t^{Tr} and P_1^{10} in mm, t in min ($5 \leq t \leq 1440$) and Tr ($2 \leq Tr \leq 100$) in years. Making $t = Tc$, P_t^{Tr} is calculated, which is transformed to intensity in $mm \ h^{-1}$, to obtain the desired intensity.

RESULTS AND DISCUSSION

Identification of the runoff coefficient

Based on the data of Table 1, the results of Table 2 and of the application of equation 11, the values of the identified runoff coefficient were obtained by means of equation 4, associated to each return period analyzed. The results that were considered consistent are shown in Table 4, along with the values of the ratios C_{Tr}/C_{10} and of median values adopted for design, or regional magnitudes.

In stations 2, Pericos and 5, Chico Ruiz, the identified runoff coefficients did not present an evolution in magnitude with the growth of the return period, due to the fact that their predictions of return periods of 2 and 5 years are very high. On the other hand, in Los Molinos the identified coefficients were very low (≤ 0.070).

Cuadro 4. Coeficientes de escurrimiento del método Racional identificados en las cuencas de las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa).

Table 4. Runoff coefficients of the Rational method identified in the watersheds of the indicated hydrometric stations of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa).

No.	Estación hidrométrica	Coeficientes de escurrimiento	Periodos de retorno (Tr) en años					
			2	5	10	25	50	100
1	Bamícori	C_{Tr}	0.255	0.323	0.371	0.422	0.471	0.523
		C_{Tr}/C_{10}	0.687	0.871	1.000	1.137	1.270	1.410
3	La Tina	C_{Tr}	m 0.130	m 0.200	m 0.235	m 0.278	0.311	0.350
		C_{Tr}/C_{10}	0.553	0.851	1.000	1.183	1.323	1.489
4	El Bledal	C_{Tr}	0.182	0.223	0.248	0.279	m 0.304	0.330
		C_{Tr}/C_{10}	0.734	0.899	1.000	1.125	1.226	1.331
7	Zopilote	C_{Tr}	0.209	M 0.344	M 0.401	M 0.463	0.470	0.477
		C_{Tr}/C_{10}	0.521	0.858	1.000	1.155	m 1.172	m 1.190
8	El Quelite	C_{Tr}	0.182	0.228	0.254	0.282	0.305	m 0.327
		C_{Tr}/C_{10}	0.717	M 0.899	1.000	m 1.110	1.201	1.287
9	Badiraguato	C_{Tr}	M 0.287	0.260	0.298	0.393	M 0.507	M 0.625
		C_{Tr}/C_{10}	M 0.963	0.872	1.000	M 1.319	M 1.701	M 2.097
10	Choix	C_{Tr}	0.167	0.238	0.291	0.374	0.446	0.505
		C_{Tr}/C_{10}	0.574	0.818	1.000	1.285	1.533	1.735
11	Guamuchil	C_{Tr}	0.133	0.228	0.296	0.387	0.468	0.534
		C_{Tr}/C_{10}	m 0.449	m 0.770	1.000	1.307	1.581	1.804
-	Valores medianos	C_{Tr}	0.182	0.233	0.294	0.381	0.457	0.491
		C_{Tr}/C_{10}	0.631	0.865	1.000	1.169	1.297	1.450

m: valor mínimo.
M: valor máximo.

En las estaciones 2, Pericos y 5, Chico Ruiz los coeficientes de escurrimiento identificados no presentaron una evolución en magnitud conforme crece el periodo de retorno, debido a que sus predicciones de periodos de retorno 2 y 5 años son muy altas. En cambio, en Los Molinos los coeficientes identificados fueron bastante bajos (≤ 0.070).

Fórmulas empíricas para estimar el C_{10}

Es común adoptar el valor del C_{10} para establecer relaciones adimensionales, ya que es muy estable. Para su estimación se desarrolló este procedimiento: con base en los resultados de los Cuadros 3 y 4, primero se calibró la fórmula de Témez (1991) para el coeficiente de escurrimiento del método Racional:

$$C = \frac{(P_d - P_o) \cdot (P_d + 28 \cdot P_o)}{(P_d + 11 \cdot P_o)^2} \quad (12)$$

donde, P_d es la precipitación diaria (mm) con igual periodo de retorno que C , y P_o es la precipitación que no produce escurrimiento (según este autor varía de 24 a 35 mm).

Empirical formulas for estimating C_{10}

It is common to adopt the value of C_{10} to establish adimensional relationships, given that it is very stable. For its estimation the following procedure was developed: based on the results of Tables 3 and 4, first the Témez formula (1991) was calibrated for the runoff coefficient of the Rational method:

$$C = \frac{(P_d - P_o) \cdot (P_d + 28 \cdot P_o)}{(P_d + 11 \cdot P_o)^2} \quad (12)$$

where P_d is the daily rainfall (mm) with equal return period as C , and P_o is the rainfall that does not produce runoff (according to this author it varies from 24 to 35 mm).

From the eight values of the P_d of Table 3 and of C of Table 4, both with return periods of 10 years (P_d^{10} , C_{10}), the magnitudes of P_o were cleared, which are necessary to accomplish equation 12, and they varied from 31.7 to 62.5 mm. Such magnitudes were related to the respective times of concentration (Tc) in hours and with $P_d = P_d^{10}$ in millimeters to obtain the following multiple linear regression:

A partir de los ocho valores de la P_d del Cuadro 3 y de C del Cuadro 4, ambos de periodo de retorno 10 años (P_d^{10} , C_{10}), se despejaron las magnitudes de P_o , necesarias para cumplir la ecuación 12 y éstas variaron de 31.7 a 62.5 mm. Tales magnitudes se relacionaron con los respectivos tiempos de concentración (Tc) en horas y con $P_d = P_d^{10}$ en milímetros para obtener la siguiente regresión lineal múltiple:

$$P_o = -11.815 + 0.0768 \cdot Tc + 0.443 \cdot P_d^{10} \quad (13)$$

cuyo coeficiente de determinación fue 0.752, con un error estándar de la estimación de 7.6 mm. Entonces, con el Tc estimado y la precipitación diaria de periodo de retorno 10 años (P_d^{10}) en la estación pluviométrica base, se aplica la ecuación 13 para obtener la P_o y con tal valor y P_d^{10} se estima C_{10} con la ecuación 12.

Predicciones en Pericos, Chico Ruiz y Los Molinos

Como una aplicación de los resultados regionales obtenidos (Cuadro 4), el método se demuestra aplicándolo a las estaciones hidrométricas citadas. También se puede usar en cualquier cuenca no aforada de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) con este procedimiento:

- 1) Localizar y cuantificar su área de cuenca (A) en km^2 y su tiempo de concentración (Tc) en h.
- 2) Localizar su centro de gravedad en los mapas de isoyetas de duración 1 h y periodos de retorno 10, 25 y 50 años, para obtener los valores respectivos.
- 3) Seleccionar una estación pluviométrica base y obtener su registro de lluvias máximas diarias anuales, para obtener las intensidades i_{Tc}^r necesarias con base en la fórmula de Chen y el procedimiento expuesto, aplicando las ecuaciones 6 a 11.
- 4) Estimar el valor de C_{10} con las ecuaciones 13 y 12; con ese valor y las relaciones regionales o finales del Cuadro 4 estimar los coeficientes de escurrimiento correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5, 25, 50 y 100 años.
- 5) Aplicar la ecuación 3 para obtener las predicciones esperadas.

La aplicación del procedimiento anterior condujo a las predicciones citadas en el Cuadro 2 para las estaciones hidrométricas Pericos, Chico Ruiz y Los Molinos.

CONCLUSIONES

La uniformidad o consistencia numérica que muestran los coeficientes de escurrimiento del método

$$P_o = -11.815 + 0.0768 \cdot Tc + 0.443 \cdot P_d^{10} \quad (13)$$

whose determination coefficient was 0.752, with a standard error of the estimation of 7.6 mm. Then, with the estimated Tc and the daily rainfall of 10 years return period (P_d^{10}) in the base pluviometric station, equation 13 is applied to obtain the P_o , and with this value and P_d^{10} , C_{10} is estimated with equation 12.

Predictions in Pericos, Chico Ruiz and Los Molinos

As an application of the regional results obtained (Table 4), the method is shown by applying it to the cited hydrometric stations. It can also be used in any ungauged watershed of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) with the following procedure:

- 1) Locate and quantify its watershed area (A) in km^2 and its concentration time (Tc) in h.
- 2) Locate its center of gravity in the maps of isoyets of 1 h duration and return periods of 10, 25 and 50 years, to obtain the respective values.
- 3) Select a base pluviometric station and obtain its record of annual maximum daily rainfalls, to obtain the necessary intensities i_{Tc}^r based on the formula of Chen and the exposed procedure, applying equations 6 to 11.
- 4) Estimate the value of C_{10} with equations 13 and 12; with this value and the regional or final relationships of Table 4, estimate the runoff coefficients corresponding to the return periods of 2, 5, 25, 50 and 100 years.
- 5) Apply equation 3 to obtain the expected predictions.

The application of the above procedure led to the predictions cited in Table 2 for hydrometric stations Pericos, Chico Ruiz and Los Molinos.

CONCLUSIONS

The uniformity or numerical consistency shown by the runoff coefficients of the Rational method identified for Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) Mexico, Table 4, demonstrates the applicability of the proposed procedure in rural watersheds of up to 1650 km^2 .

The calibration shown for the Rational method and its application for obtaining predictions in ungauged watersheds or with short or unreliable records, can be considered a reliable and efficient regional method of flood estimation, in regions where rainfall is the determining factor in the genesis of the maximum flows.

It is recommended to identify the runoff coefficients of the Rational method and to establish their regional relationships in other geographic zones of the country.

Racional identificados para la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa; México), Cuadro 4, demuestran la aplicabilidad del procedimiento propuesto en cuencas rurales de hasta 1650 km².

La calibración mostrada para el método Racional y su aplicación para obtener predicciones en cuencas sin aforos o con registros cortos o poco confiables, puede ser considerada un método regional de estimación de crecientes eficiente y confiable, en regiones donde la lluvia es el factor determinante en la génesis de las avenidas máximas.

Se recomienda identificar los coeficientes de escurrimiento del método Racional y establecer sus relaciones regionales en otras zonas geográficas del país.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las observaciones del editor y de los dos árbitros anónimos, mismas que ayudaron a mejorar la redacción de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Bethlahmy, N. 1977. Flood analysis by SMEMAX transformation. *J. Hydraulics Division* 103: 69-78.
- Bobée, B., and F. Ashkar. 1991. Log-Pearson type 3 distribution. *In: The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, U.S.A. pp: 76-120.
- Campos A., D. F. 2000. Aspectos de seguridad hidrológica de embalses superficiales. *In: Primer Foro del Agua en el Valle de San Luis Potosí*. Comité Técnico de Aguas Subterráneas (CO-TAS). Colegio de San Luis. San Luis Potosí, S.L.P. 22 p.
- 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. 2007. Parámetros hidrológicos de la cuenca. *In: Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento*. Edición del autor. San Luis Potosí, S.L.P. pp: 41-50.
- Chander, S., S. K. Spolia, and A. Kumar. 1978. Flood frequency analysis by Power Transformation. *J. Hydraulics Division* 104: 1495-1504.
- Chen, C-I. 1983. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *J. Hydraulics Eng.* 109: 1603-1621.
- Dooge, J. C. I. 1973. *Linear Theory of Hydrologic Systems*. Technical Bulletin No. 1468 of the Agricultural Research Service, U.S.D.A. Washington, D.C., U.S.A. pp: 3-43.
- Escalante S., C. 1999. Inferencia y pronóstico de eventos con base en la teoría de los subconjuntos borrosos. *Ing. Hidráulica en Méx.* XIV: 5-17.
- 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). 2003. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). 8 CD. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Comisión Nacional del Agua-IMTA. Jiutepec, Morelos.
- Martínez M., S. I. 2000. Geomorfología de la cuenca. *In: Introducción a la Hidrología Superficial*. Textos Universitarios. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, Ags. pp: 27-53.
- Morris, E. C. 1982. Mixed-Population Frequency Analysis. Training Document 17 of the Hydrologic Engineering Center, U.S.A.C.E. Davis, California, U.S.A. 43 p.
- Pilgrim, D. H., and I. Cordery. 1993. Flood runoff. *In: Maidment, D. R. (ed). Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. New York, U.S.A. pp: 9.1-9.42
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes). 1990. ISOYETAS de Intensidad-Duración-Frecuencia. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura de la S.C.T. México, D. F. 495 p.
- SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1975. Actualización al Boletín Hidrológico No. 36. Tomo VI, periodo 1970-73. Subsecretaría de Planeación de la S.R.H. México, D. F.
- Stedinger, J. R., R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou. 1993. Frequency analysis of extreme events. *In: Maidment D. R. (ed). Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. New York, U.S.A. pp: 18.1-18.66
- 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.
- Weiss, L. L. 1964. Ratio of true fixed-interval maximum rainfall. *J. Hydraulics Division* 90: 77-82.