

ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIA DE CRECIENTES EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA No. 10 (SINALOA), MÉXICO. 1: ÍNDICES DE ESTACIONALIDAD Y REGIONES DE INFLUENCIA

REGIONAL FLOOD FREQUENCY ANALYSIS AT HYDROLOGICAL REGION No. 10 (SINALOA), MÉXICO. 1: SEASONALITY MEASURES AND REGIONS OF INFLUENCE

Daniel F. Campos-Aranda

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

RESUMEN

El Análisis Regional de Frecuencia de Crecientes (ARFC) se emplea para mejorar la exactitud de las estimaciones de crecientes de diseño en sitios donde el registro de datos, de gastos máximos anuales, es escaso o no existe. Para el ARFC es necesario identificar la región de estudio para transferir la información de gastos máximos. Las regiones generalmente son formadas con base en alguna medida de similitud o de disimilitud entre las cuencas. En este estudio se aplicó un método que usa la estacionalidad de las crecientes como medida de similitud en la evaluación de la respuesta hidrológica de la cuenca, para agruparlas bajo el concepto de Región de Influencia (RDI). Los registros de 21 estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) se procesaron y sus RDI se definieron únicamente con cinco estaciones auxiliares, debido a la presencia de dos grupos de cuencas en relación con sus índices de estacionalidad.

Palabras clave: regionalización, estadísticos direccionales, índice de disimilitud estacional.

INTRODUCCIÓN

Una tarea fundamental de los hidrólogos es la estimación, lo más exacta posible y en un sitio de interés, de las magnitudes de las crecientes asociadas a una cierta probabilidad de excedencia, es decir a un determinado periodo de retorno o intervalo promedio en años, entre la ocurrencia de una creciente igual o mayor. Esas estimaciones o predicciones son cruciales en el diseño o la revisión hidrológica de todas las obras hidráulicas, sean éstas

ABSTRACT

The Regional Flood Frequency Analysis (RFFA) is used to improve the accuracy of design flood estimates in sites where the recording of data, of annual maximum flows is scarce or nonexistent. For RFFA it is necessary to identify the study region to transfer the maximum flow information. Regions are generally formed on the basis of some measure of similarity or dissimilarity between the watersheds. The method used in this study is one that applies flood seasonality as a measure of similarity in assessing the hydrological response of the watershed in order to group floods under the concept of Region of Influence (ROI). Records from 21 gaging stations of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) were processed and their ROI defined with only five auxiliary stations due to the presence of two groups of watersheds in relation to their seasonality indices.

Keywords: regionalization, directional statistics, seasonal dissimilarity index.

INTRODUCTION

A key task of hydrologists is to estimate, as accurately as possible and at a site of interest, the magnitude of floods associated with a certain probability of exceedance, ie, with a certain period of return or average interval in years between the occurrence of an equal or greater flood. These estimates or predictions are crucial in the design or hydrological review of all waterworks whether they are of use (reservoirs and diverting dams), protection (check dams, dikes and corrections) or crossover (sewers and bridges).

The Regional Flood Frequency Analysis (RFFA) is used to improve the estimation of flood potential in sites or locations having records of annual maximum

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: junio, 2013. Aprobado: febrero, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 48: 147-158. 2014.

de aprovechamiento (embalses y presas derivadoras), de protección (presas de control, diques y rectificaciones) o de cruce (alcantarillas y puentes).

El Análisis Regional de Frecuencia de Crecientes (ARFC) se usa para mejorar la estimación del potencial de las crecientes en sitios o localidades que tienen registros de gastos máximos anuales de longitud reducida, en relación con los periodos de retorno requeridos. En esas situaciones, la información relativa a las crecientes de varios sitios cercanos se puede utilizar para compensar la escasez en la localidad de interés e incluso se puede usar en la caracterización del régimen de crecientes en cuencas sin aforos (GREHYS, 1996; Hosking y Wallis, 1997).

Una etapa fundamental del ARFC es la identificación de la región en la que se puede transferir información de gastos máximos de un sitio a otro, es decir de una cuenca a otra. Con este requisito, la región será una selección o grupo de cuencas no necesariamente contiguas sino similares en términos de su respuesta hidrológica con respecto a las crecientes y las características de éstas. En general, las regiones se forman con base en alguna medida de similitud entre las cuencas o sus registros de crecientes (Burn, 1997; Cunderlik y Burn, 2002).

El objetivo de este estudio fue detallar la caracterización estacional de las crecientes de una cuenca para utilizar sus índices como medidas de similitud entre ellas y así agruparlas según el enfoque de Región de Influencia (RDI). La RDI es una selección única de cuencas auxiliares, cuyos registros de crecientes presentan similitud con el de la cuenca base. Según Ouarda *et al.* (2001), el enfoque de RDI es más exacto que los tradicionales de regiones fijas. Las 21 estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) tienen régimen de escurrimiento no afectado por embalses y registros de gasto máximo anual mayores de 20 años. La obtención numérica de sus índices de estacionalidad y del índice de disimilitud estacional permitió definir el RDI de cada una y, con base en esos resultados, se desarrolló un método regional de estimación de crecientes en cuencas sin aforos de la región hidrológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Regionalización

En el ARFC todos los enfoques de regionalización requieren la selección de variables usadas como medidas de semejanza o de

flows of reduced length in relation to the return periods required. In those situations, the information on floods of several nearby sites can be utilized to offset shortage in the location of interest and can even be used in the characterization of the flood regime in watersheds without gauging (GREHYS, 1996, Hosking and Wallis, 1997).

A key step of RFFA is the identification of the region in which information of maximum flows can be transferred from one place to another, ie from one watershed to another. With this requirement, the region will be a selection or group of watersheds not necessarily adjacent but similar in terms of their hydrological response with respect to floods and their characteristics. In general, regions are formed on the basis of some similarity measure between watersheds or their flood records (Burn, 1997; Cunderlik and Burn, 2002).

The objective of this study was to characterize the floods seasonal features of a watershed in order to use its indices as measures of similarity between them and thus group them according to the approach of Region of Influence (ROI). The ROI is a unique selection of auxiliary watersheds, whose flood records exhibit similarity with that of the base watershed. According to Ouarda *et al.* (2001), the ROI approach is more accurate than the traditional of fixed regions. The 21 gauging stations of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) have a flow regime not affected by dams, and annual maximum flow records are older than 20 years. Obtaining their seasonality indices and the index of seasonal dissimilarity allowed to define the ROI of each, and based on these results, a regional method of flood estimation was developed for watersheds without gauging of the hydrological region.

MATERIALS AND METHODS

Regionalization

In RFFA all the approaches of regionalization require the selection of variables used as measurements of similarity or dissimilarity between watersheds. Generally, two types of variables are used to set the similarity between watersheds: 1) physiographic features, and 2) statistical properties of the flood record. The main argument contrary to the use of physiographic features is that there is no guarantee that the physiographic similarity implies a similar hydrological response, especially if watersheds are distant. The basic problem in the use of flood records implies a spurious situation since the data are used to form regions and then to assess their homogeneity (Burn, 1997).

disimilitud entre cuencas. Por lo general, se utilizan dos tipos de variables para establecer la similitud entre cuencas: 1) características fisiográficas y 2) propiedades estadísticas del registro de crecientes. El argumento principal contrario al uso de las características fisiográficas, es que no hay garantía de que la semejanza fisiográfica implique similitud en la respuesta hidrológica, sobre todo si las cuencas están distantes. El problema básico para el uso de los registros de crecientes implica una situación espuria, pues los datos se usan para formar las regiones y después para evaluar su homogeneidad (Burn, 1997).

Índices de estacionalidad

Zrinji y Burn (1996), Burn (1997) y Cunderlik y Burn (2002) sugieren que la fecha de ocurrencia media y la regularidad estacional de las crecientes pueden utilizarse como medidas de similitud de la respuesta hidrológica de una cuenca. La similitud en la distribución temporal y la regularidad de las crecientes de dos cuencas implica una semejanza en características fisiográficas y meteorológicas. Entonces, esas cuencas se pueden integrar en una región con propósitos de ARFC. El enfoque de regionalización, con base en las características estacionales de las crecientes, tiene la ventaja de reservar el uso de la información hidrométrica para verificar la homogeneidad regional.

Los estadísticos direccionales datan de principios de los años setenta y constituyen una herramienta simple para definir medidas de similitud procedentes de las fechas de ocurrencia de las crecientes. Existen convenciones o formas diversas de usar el círculo, para definir los estadísticos direccionales (Ramírez *et al.*, 2009); en adelante se usará la utilizada por Burn (1997), por su semejanza con los cuadrantes cartesianos. En ese esquema, el avance es contrario a las manecillas del reloj si se inicia en el eje de las abscisas; por ello, el día 1 de enero y el día 31 de diciembre coinciden en el inicio.

Para establecer los índices de estacionalidad se comienza por transformar la fecha de ocurrencia de cada gasto máximo anual a día juliano, es decir, de 0 a 365. Lo anterior implica no considerar los años bisiestos. Las fechas de enero quedan igual, a las de febrero se les suma 31, a las de marzo 59, a las de abril 90 y así sucesivamente hasta las de diciembre que se les agrega 334, para obtener el día juliano. En seguida se obtiene el ángulo θ_i en grados, correspondiente a la fecha i de cada creciente, con la multiplicación del día juliano por 0.9863014, que es el cociente entre 360° y 365 días. Cada fecha de una creciente anual se puede interpretar como un vector de magnitud unitaria y dirección θ_i . Al tener n datos de crecientes, las coordenadas promedio del Día Medio de las Crecientes (DMC) serán (Zrinji y Burn, 1996; Burn, 1997; Cunderlik y Burn, 2002):

Seasonality indices

Zrinji and Burn (1996), Burn (1997), and Cunderlik and Burn (2002) suggest that the average occurrence date and the seasonal regularity of floods can be used as measures of similarity of a watershed hydrological response. The similarity in the temporary distribution and regularity of floods of two watersheds implies a similarity in physiographic and weather characteristics. So these watersheds can be integrated in a region for RFFA purposes. Based on the seasonal characteristics of floods, the regionalization approach has the advantage of reserving the use of hydrometric information to verify regional homogeneity.

Directional statistics date from the early seventies and constitute a simple tool to define similarity measures from the dates of flood occurrence. There are conventions or various forms of using the circle to define the directional statistics (Ramírez *et al.*, 2009); hereinafter the tool used in this study will be the one employed by Burn (1997) for its resemblance to Cartesian quadrants. In this scheme, development is contrary to clockwise if you start in the abscissa; therefore, January 1 and December 31 match at startup.

To establish the seasonality indices it is necessary to start by converting the date of occurrence of each maximum annual flow to Julian day, ie, from 0 to 365. This implies not considering the leap years. January dates remain the same, to February you add 31, March 59, April 90 and so on until December to which 334 is added to obtain the Julian day. Then the θ_i angle is obtained in degrees, corresponding to the i date of each flood, with the multiplication of Julian day by 0.9863014, which is the ratio between 360° and 365 days. Each date of an annual flood can be interpreted as a vector of unit magnitude and θ_i direction. By having the n data of floods, the average coordinates of the Mean Day of Floods (DMC) will be (Zrinji and Burn, 1996; Burn, 1997; Cunderlik and Burn, 2002):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i) \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta_i) \quad (2)$$

Thus, the $\bar{\theta}$ mean direction of the DMC in polar coordinates is:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right) \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i) \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta_i) \quad (2)$$

Por lo tanto, la dirección media $\bar{\theta}$ del DMC en coordenadas polares será:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right) \quad (3)$$

La ecuación anterior se aplica obteniendo primero el ángulo tangente de $\bar{y}$ entre $\bar{x}$, ambas con signo positivo denominado α ; entonces si $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son positivas $\bar{\theta} = \alpha$, si $\bar{x} < 0$ y $\bar{y} > 0$ $\bar{\theta} = 180^\circ - \alpha$, si ambas son negativas $\bar{\theta} = 180^\circ + \alpha$ y si $\bar{x} > 0$ y $\bar{y} < 0$ $\bar{\theta} = 360^\circ - \alpha$. El valor de DMC en día juliano se obtiene al dividir $\bar{\theta}$ entre 0.9863014.

El índice DMC indica el tiempo promedio de ocurrencia de los gastos máximos anuales en una cuenca dada. Se puede esperar que cuencas con valores similares del DMC presenten semejanzas en otras características hidrológicas importantes; así, el DMC podrá estar relacionado con el tamaño de la cuenca y con su localización geográfica.

Una medida de la variabilidad de las n fechas de ocurrencia de las crecientes, en relación con el DMC, se puede estimar calculando la resultante media, cuya expresión es:

$$\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (4)$$

El índice de estacionalidad $\bar{r}$ es una medida adimensional de la dispersión de los datos, toma valores entre cero y uno. Un valor unitario indica que todas las crecientes ocurren en la misma fecha, en cambio un valor cercano a cero implica gran variabilidad de ocurrencias a lo largo de todo el año.

Ramírez *et al.* (2009) establecen los siguientes cinco grados de estacionalidad: (1) muy fuerte, cuando $\bar{r} > 0.90$; (2) fuerte, cuando $\bar{r}$ fluctúa entre 0.70 y 0.90; (3) media, cuando $\bar{r}$ varía de 0.50 a 0.70; (4) baja, cuando $\bar{r}$ cambia de 0.10 a 0.50; y (5) muy baja o débil, cuando $\bar{r} < 0.10$.

Índice de disimilitud estacional

De acuerdo con Zrinji y Burn (1996) y Burn (1997), los índices de estacionalidad expuestos (DMC y $\bar{r}$) pueden ser empleados para obtener la disimilitud entre cuencas. Cunderlik y

The above equation is applied by first obtaining the tangent angle of $\bar{y}$ between $\bar{x}$, both with positive sign referred to as α ; then if $\bar{x}$ and $\bar{y}$ are positive $\bar{\theta} = \alpha$, if $\bar{x} < 0$ and $\bar{y} > 0$ $\bar{\theta} = 180^\circ - \alpha$, if both are negative $\bar{\theta} = 180^\circ + \alpha$ and if $\bar{x} > 0$ and $\bar{y} < 0$ $\bar{\theta} = 360^\circ - \alpha$. The DMC value in Julian day is obtained by dividing $\bar{\theta}$ by 0.9863014.

The DMC index indicates the average time of occurrence of maximum annual flows in a given watershed. Watersheds with similar DMC values are expected to present similarities also in other important hydrological characteristics; so the DMC may be related to the size of the watershed and its geographical location.

A measure of the variability of n dates of flood occurrence in connection with the DMC can be estimated by calculating the average result, whose expression is:

$$\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (4)$$

The seasonality index $\bar{r}$ is a dimensionless measure of data dispersion, taking values between zero and one. A unit value indicates that all floods occur on the same date, while a value close to zero implies great variability of occurrences throughout the whole year.

Ramírez *et al.* (2009) established the following five degrees of seasonality: (1) very strong, when $\bar{r} > 0.90$; (2) severe when $\bar{r}$ ranges between 0.70 and 0.90; (3) average, when $\bar{r}$ varies from 0.50 to 0.70; (4) low, when $\bar{r}$ changes from 0.10 to 0.50; and (5) very low or weak, when $\bar{r} < 0.10$.

Index of seasonal dissimilarity

According to Zrinji and Burn (1996) and Burn (1997), the seasonality indices exposed (DMC and $\bar{r}$) may be employed to obtain dissimilarity between watersheds. Cunderlik and Burn (2002) indicate that the DMC index is only appropriate in watersheds and regions where the flood regime is unimodal, that is, floods are caused by a single process (summer rains, cyclone rains, thaw, or others). The DMC index captures only part of the information contained in the regime of floods, thus leading to unreliable results in watersheds with multimodal frequency floods. Therefore, the seasonal dissimilarity index is defined (IDE), which combines the DMC and $\bar{r}$ in an Euclidean distance (Equation 6) between watersheds, in the space of x and y coordinates corresponding to the mean date of floods; its expression is (Burn, 1997; Cunderlik and Burn, 2002):

$$IDE_{ij} = \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_j)^2} \quad (5)$$

Burn (2002) indican que el índice DMC únicamente es apropiado en cuencas y regiones en donde el régimen de las crecientes es unimodal, es decir, que éstas son originadas por un solo proceso (lluvias de verano, lluvias ciclónicas, deshielo, u otros). El índice DMC captura sólo una parte de la información contenida en el régimen de las crecientes, por esto conduce a resultados poco confiables en cuencas con frecuencia de crecientes multimodal. Por ello, se define el índice de disimilitud estacional (IDE) que combina al DMC y al $\bar{F}$ en una distancia Euclidiana (ecuación 6) entre cuencas, en el espacio de coordenadas x y y correspondientes a la fecha media de las crecientes; su expresión es (Burn, 1997; Cunderlik y Burn, 2002):

$$IDE_{ij} = \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_j)^2} \quad (5)$$

el IDE_{ij} es una medida de la semejanza entre las cuencas i y j , por lo que un valor pequeño indica que esas cuencas tienen similitud estacional en sus crecientes. Los valores de $\bar{x}$ y $\bar{y}$ para cada cuenca se obtienen con las ecuaciones 1 y 2.

Región de influencia

Hacia finales de la década de los años ochenta se sugirió formar una región por cada cuenca analizada o base. Cada región ahora está integrada por cuencas auxiliares que tienen un potencial de similitud única con la cuenca base. Para la búsqueda de la similitud entre cuencas se propuso la distancia Euclidiana ponderada, definida como (Burn, 1990):

$$D_{ij} = \left[\sum_{k=1}^m W_k (C_i^k - C_j^k)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

donde D_{ij} es la distancia Euclidiana entre la cuenca base i y la auxiliar j , m es el número de atributos o propiedades fisiográficas o hidrométricas que incluirá la distancia, W_k es el “peso” asignado al atributo k y C^* es el valor estandarizado del atributo. La estandarización elimina las unidades y evita un sesgo originado por las diferentes escalas de cada atributo; se realiza con la desviación estándar de los valores de los atributos de todas las cuencas analizadas.

Con las distancias Euclidianas, cada región de influencia se puede definir bajo dos enfoques: 1) seleccionando un número fijo de cuencas auxiliares, las de menor valor de D_{ij} ; y 2) adoptando todas las cuencas que tengan un valor menor de una cierta magnitud umbral adoptada para la D_{ij} regional. Campos (2008) expuso una aplicación de la RDI en México.

the IDE_{ij} is a measure of dissimilarity between watersheds i and j , so that a small value indicates that these watersheds have seasonal similarity in their floods. The values of $\bar{x}$ and $\bar{y}$ for each watershed are obtained with equations 1 and 2.

Region of influence

Towards the end of the decade of the eighties the proposal was to form a region for each watershed analyzed or base watershed. Each region is now integrated by auxiliary watersheds that have a potential of unique similarity with the base watershed. To find the similarity between watersheds, the application proposed was the weighted Euclidean distance, defined as (Burn, 1990):

$$D_{ij} = \left[\sum_{k=1}^m W_k (C_i^k - C_j^k)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

where D_{ij} is the Euclidean distance between the base watershed i and the auxiliary j ; m is the number of attributes or physiographic or hydrometric properties including distance, W_k is the “weight” assigned to the attribute k , and C^* is the standardized value of the attribute. Standardization eliminates units and prevents bias caused by the different scales of each attribute; it is performed with the standard deviation of the values of attributes of all the watersheds analyzed.

With Euclidean distances, it is possible to define each region of influence under two approaches: 1) selecting a fixed number of auxiliary watersheds, of lower D_{ij} value, and 2) taking all watersheds having a value lower than a certain threshold magnitude adopted for regional D_{ij} . Campos (2008) presented an application of the ROI in México.

Hydrometric processed information

According to Soto and Escalante (1999), in Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) there are 42 gauging stations with a reliable record; of these, the present study surveyed 20, specifically those whose runoff regimes were not affected by dams and had records of more than 20 years operating. Furthermore, the gauging station Chico Ruiz with 19 years registration was among them. The BANDAS system (IMTA, 2002) provided all the information of maximum annual flows of the 20 gauging stations (first five columns of Table 1), presented in their latitude descending order (Figure 1). This information comes from CD-1 and includes, in addition to the maximum annual flow, the year, month, day, time and scale reading. Data from San Francisco station come from Hydrological Bulletin No. 36 (SRH, 1975) (Table 2).

Información hidrométrica procesada

De acuerdo con Soto y Escalante (1999), en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) existen 42 estaciones hidrométricas con registro confiable; de éstas, únicamente 20 tienen su régimen de escurrimientos no afectado por los embalses y registros mayores de 20 años, por ello, fueron las utilizadas. Además, se incluyó la estación de aforos Chico Ruiz con 19 años de registro. En el sistema BANDAS (IMTA, 2002) se obtuvo toda la información de gastos máximos anuales de las 20 estaciones de aforos (primeras cinco columnas del Cuadro 1), expuestas en orden decreciente de latitud (Figura 1). Esta información procede del CD-1 e incluye, además del gasto máximo anual, el año, mes, día, hora y lectura de escala. Los datos de la estación San Francisco proceden del Boletín Hidrológico No. 36 (SRH, 1975) (Cuadro 2).

Los registros de las estaciones hidrométricas Huites y Guamuchil abarcan hasta antes del año en que la construcción del embalse respectivo afectó su régimen. El registro más corto tiene 19 años y los más amplios 56 años (Cuadro 1). Los 21 registros anuales que fueron procesados tienen moda de 33.2 años, con medianas poblacional y muestral de 35.7 y 33 años.

The records of gauging stations Huites and Guamuchil cover until the year before the construction of the respective reservoir affected their regime. The shortest record is 19 years old and the oldest 56 (Table 1). The 21 annual records that were processed have a mode of 33.2 years old with population and sample medians of 35.7 and 33 years.

RESULTS AND DISCUSSION

Estimate of seasonality indices (DMC and r)

The estimations of the directional vectors of each flood recorded datum were made by using equations 1 and 2, and the seasonality indices and each recording (DMC and $\bar{r}$) (Table 1 columns 9-11) were calculated with equations 3 and 4. The San Francisco and Bamícori gauging stations were the most dissimilar in watershed size and seasonal indices (Tables 2 and 3, Figure 2).

Cuadro 1. Características generales e índices de estacionalidad en 21 estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa).

Table 1. General characteristics and seasonality indices in 21 gauging stations of Hydrological Region No. 10 (Sinaloa).

Características generales:						Índices de estacionalidad:				
Núm.	Nombre	Clave Bandas	Área (km ²)	Registro (disponible)	$\bar{x}$	$\bar{y}$	Dirección media ($\bar{\theta}$)	DMC	Fecha media	Estacionalidad ($\bar{r}$)
1	Chinipas	10064	5098	1965–2002 (24)	–0.02966	–0.44474	266.2	269.9	Sep. 27	0.4457
2	Palo Dulce	10077	6439	1958–1986 (21)	0.10970	–0.32232	288.8	292.8	Oct. 20	0.3405
3	San Francisco	–	17 531	1941–1973 (33)	0.08393	–0.40469	281.7	285.6	Oct. 13	0.4133
4	Huites	10037	26 057	1942–1992 (51)	0.12536	–0.35228	289.6	293.6	Oct. 21	0.3739
5	Choix	10066	1403	1956–2002 (38)	–0.33946	–0.59942	240.5	243.8	Sep. 1	0.6889
6	Bamícori	10057	223	1951–1983 (33)	–0.59387	–0.65074	227.6	230.8	Ago. 19	0.8810
7	La Tina	10078	254	1960–1983 (24)	–0.33202	–0.63963	242.6	246.0	Sep. 3	0.7207
8	Jaina	10036	8179	1942–1998 (56)	0.02848	–0.52733	273.1	276.9	Oct. 4	0.5281
9	Naranjo	10029	2064	1939–1984 (45)	–0.34934	–0.61205	240.3	243.6	Sep. 1	0.7047
10	Zopilote	10034	666	1939–2001 (56)	–0.46001	–0.69351	236.4	239.7	Ago. 28	0.8322
11	Guamuchil	10031	1645	1940–1971 (32)	–0.41727	–0.59885	235.1	238.4	Ago. 26	0.7299
12	La Huerta	10113	6149	1970–1999 (28)	0.25949	–0.33260	308.0	312.3	Nov. 8	0.4219
13	Badiraguato	10079	1018	1974–1999 (26)	–0.11031	–0.58864	259.4	263.0	Sep. 20	0.5989
14	Chico Ruiz	10090	391	1977–2002 (19)	–0.47744	–0.66189	234.2	237.5	Ago. 25	0.8161
15	Pericos	10086	270	1961–1992 (30)	–0.55300	–0.59972	227.3	230.5	Ago. 19	0.8158
16	Tamazula	10087	2241	1963–1999 (32)	–0.20822	–0.55498	249.4	252.9	Sep. 10	0.5928
17	El Bledal	10027	371	1938–1994 (56)	–0.48809	–0.69076	234.8	238.0	Ago. 26	0.8458
18	Santa Cruz	10040	8919	1944–2002 (52)	0.09365	–0.54268	279.8	283.7	Oct. 11	0.5507
19	Acatitán	10070	1884	1955–2002 (43)	–0.22228	–0.71604	252.8	256.3	Sep. 13	0.7497
20	Ixpalino	10065	6166	1953–1999 (45)	0.06429	–0.61811	275.9	279.7	Oct. 7	0.6214
21	El Quelite	10083	835	1961–2001 (33)	–0.28884	–0.74975	248.9	252.4	Sep. 9	0.8035

DMC: día medio de las crecientes ♦ DMC: mean day of flood.

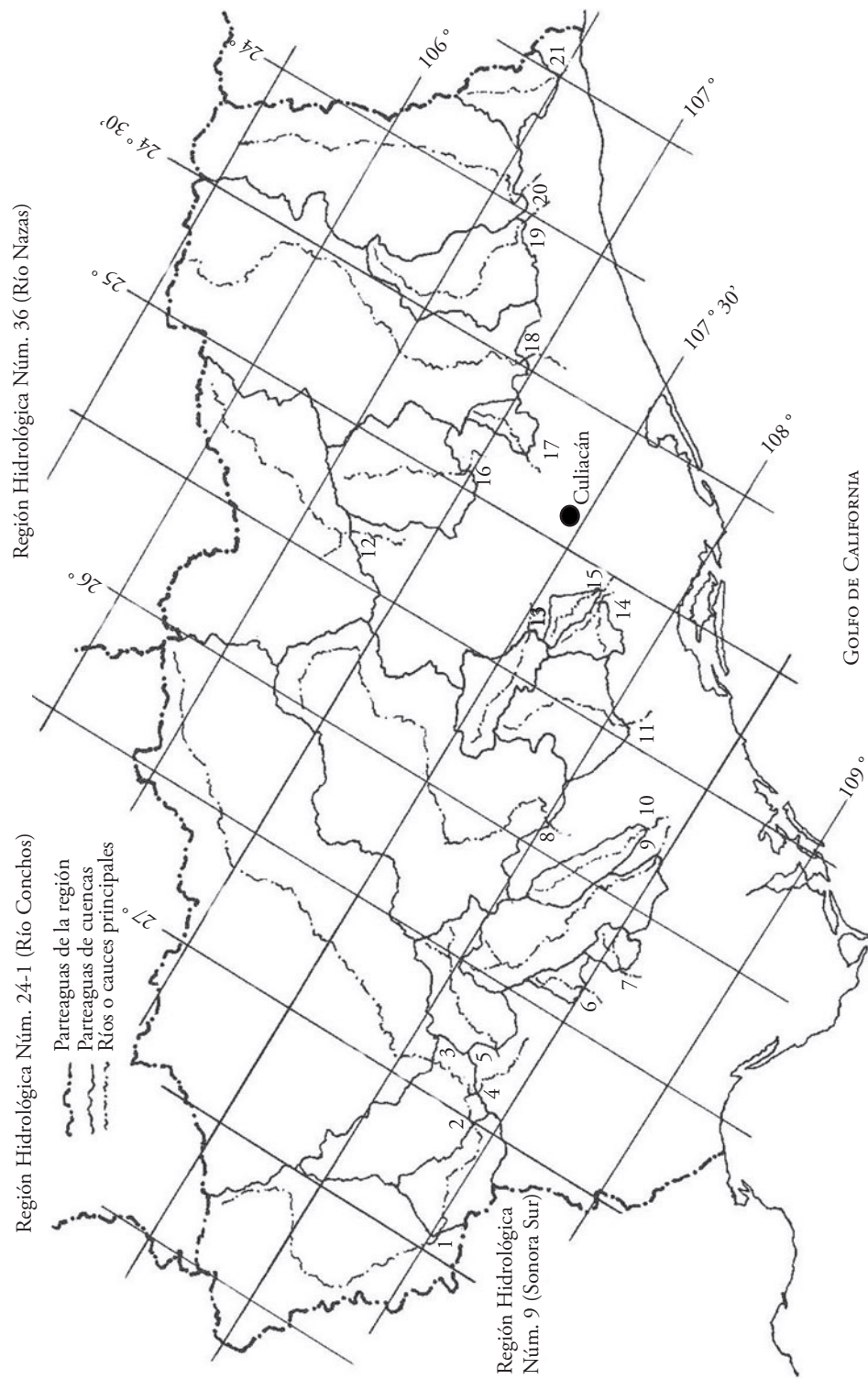


Figura 1. Localización en la Región Hidrológica Núm. 10 (Sinaloa) de las cuencas de las 21 estaciones hidrométricas procesadas.
Figure 1. Location at the Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) of the watersheds of the 21 gauging stations processed.

Cuadro 2. Crecientes anuales en la estación hidrométrica San Francisco y su procesamiento para obtener los índices de estacionalidad ($\bar{\theta}$, DMC y $\bar{r}$).
Table 2. Annual floods in the San Francisco gauging station and processing for seasonality indices ($\bar{\theta}$, DMC and $\bar{r}$).

Año	Gasto (m ³ .s ⁻¹)	Mes	Día	Día juliano	θ_i	x_i	y_i
1941	1326	Dic.	12	346	341.26	0.9470	-0.3213
1942	1558	Ago.	19	231	227.84	-0.6713	-0.7412
1943	2292	Oct.	11	284	280.11	0.1755	-0.9845
1944	1376	Dic	28	362	357.04	0.9987	-0.0516
1945	894	Jul.	29	210	207.12	-0.8900	-0.4559
1946	559	Ago	30	242	238.68	-0.5197	-0.8543
1947	1137	Ago.	29	241	237.70	-0.5344	-0.8452
1948	1668	Feb.	5	36	35.51	0.8140	0.5808
1949	4710	Ene.	14	14	13.81	0.9711	0.2387
1950	2920	Ene.	13	13	12.82	0.9751	0.2219
1951	493	Dic.	14	348	343.23	0.9575	-0.2885
1952	695	Jul.	22	203	200.22	-0.9384	-0.3456
1953	678	Ago.	24	236	232.77	-0.6051	-0.7962
1954	683	Ago.	18	230	226.85	-0.6839	-0.7296
1955	3101	Ene.	15	15	14.79	0.9668	0.2554
1956	583	Ago.	23	235	231.78	-0.6187	-0.7857
1957	434	Sep.	3	246	242.63	-0.4597	-0.8881
1958	3750	Sep.	20	263	259.40	-0.1840	-0.9829
1959	1572	Dic.	9	343	338.30	0.9291	-0.3697
1960	6640	Ene.	12	12	11.84	0.9787	0.2051
1961	880	Ene.	24	24	23.67	0.9159	0.4015
1962	997	Oct.	5	278	274.19	0.0731	-0.9973
1963	2134	Dic.	12	346	341.26	0.9470	-0.3213
1964	735	Ago.	1	213	210.08	-0.8653	-0.5012
1965	952	Sep.	2	245	241.64	-0.4749	-0.8800
1966	2144	Ago.	19	231	227.84	-0.6713	-0.7412
1967	1175	Dic.	16	350	345.21	0.9668	-0.2554
1968	1308	Jul.	31	212	209.10	-0.8738	-0.4863
1969	605	Jul	17	198	195.29	-0.9646	-0.2637
1970	980	Ago.	13	225	221.92	-0.7441	-0.6681
1971	950	Oct.	27	300	295.89	0.4367	-0.8996
1972	2129	Nov.	24	328	323.51	0.8039	-0.5947
1973	4855	Feb.	22	53	52.27	0.6119	0.7909
Suma	—	—	—	—	—	2.76970	-13.35475
Promedio	1724.636	—	—	—	—	0.08393	-0.40469
Índices de Estacionalidad	$\bar{\theta}=281.7^\circ$	DMC = 285.6 (Oct. 13)				$\bar{r}=0.4133$	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo de los índices de estacionalidad (DMC y $\bar{r}$)

Con las ecuaciones 1 y 2 se estimaron los vectores direccionales para cada dato de un registro de crecien-

Seasonal dissimilarity indices (IDE)

Applying equation 5 between each station (i) (Table 1) and the remaining (j) determined their IDE. Table 4 includes the stations of Table 1 taken as basis and its 20 auxiliary stations in progressive

tes y para cada registro, sus índices de estacionalidad (DMC y $\bar{r}$) con las ecuaciones 3 y 4 (columnas 9 a 11 del Cuadro 1). Las estaciones hidrométricas San Francisco y Bamícori fueron las más disímiles en tamaño de cuenca y en índices estacionales (Cuadros 2 y 3; Figura 2).

order of dissimilarity and minimal (number of order 1) and maximum IDE (number 20). Based on this information, the auxiliary stations were defined to form the regions of influence of each base station (minor IDE, from left to right a number of stations less than or equal to 20 of Table 4).

Cuadro 3. Crecientes anuales en la estación hidrométrica Bamícori y su procesamiento para obtener los índices de estacionalidad ($\bar{\theta}$, DMC y $\bar{r}$).

Table 3. Annual floods in Bamícori gauging station and their processing for seasonality indices ($\bar{\theta}$, DMC and $\bar{r}$).

Año	Gasto (m ³ .s ⁻¹)	Mes	Día	Día juliano	θ_i	x_i	y_i
1951	58	Ago.	1	213	210.08	-0.8653	-0.5012
1952	153	Ago.	18	230	226.85	-0.6839	-0.7296
1953	124	Ago.	18	230	226.85	-0.6839	-0.7296
1954	405	Jul.	9	190	187.40	-0.9917	-0.1287
1955	379	Ago.	20	232	228.82	-0.6584	-0.7527
1956	379	Jun.	27	178	175.56	-0.9970	0.0774
1957	170	Jul.	23	204	201.21	-0.9323	-0.3617
1958	192	Ago.	9	221	217.97	-0.7883	-0.6153
1959	67	Sep.	7	250	246.58	-0.3975	-0.9176
1960	89	Ago.	9	221	217.97	-0.7883	-0.6153
1961	155	Sep.	15	258	254.47	-0.2678	-0.9635
1962	46	Jul.	7	188	185.42	-0.9955	-0.0945
1963	110	Ago.	13	225	221.92	-0.7441	-0.6681
1964	94	Ago.	9	221	217.97	-0.7883	-0.6153
1965	650	Ago.	21	233	229.81	-0.6453	-0.7639
1966	93	Ago.	9	221	217.97	-0.7883	-0.6153
1967	49	Sep.	5	248	244.60	-0.4289	-0.9034
1968	438	Jul.	12	193	190.36	-0.9837	-0.1798
1969	22	Jul.	28	209	206.14	-0.8977	-0.4405
1970	138	Jul.	27	208	205.15	-0.9052	-0.4250
1971	44	Oct.	29	302	297.86	0.4674	-0.8841
1972	70	Ago.	8	220	216.99	-0.7988	-0.6016
1973	141	Ago.	13	225	221.92	-0.7441	-0.6681
1974	650	Ago.	30	242	238.68	-0.5197	-0.8543
1975	100	Jul.	21	202	199.23	-0.9442	-0.3294
1976	495	Oct.	1	274	270.25	0.0043	-1.0000
1977	214	Oct.	5	278	274.19	0.0731	-0.9973
1978	94	Sep.	11	254	250.52	-0.3335	-0.9428
1979	54	Jul.	27	208	205.15	-0.9052	-0.4250
1980	363	Sep.	3	246	242.63	-0.4597	-0.8881
1981	134	Oct.	8	281	277.15	0.1245	-0.9922
1982	54	Sep.	30	273	269.26	-0.0129	-0.9999
1983	19	Sep	12	255	251.51	-0.3172	-0.9484
Suma	6243	—	—	—	—	-19.59764	-21.47457
Promedio	189.182	—	—	—	—	-0.59387	-0.65074
Índices de Estacionalidad	$\bar{\theta} = 227.6^\circ$	DMC = 230.8 (Ago. 19)				$\bar{r} = 0.8810$	

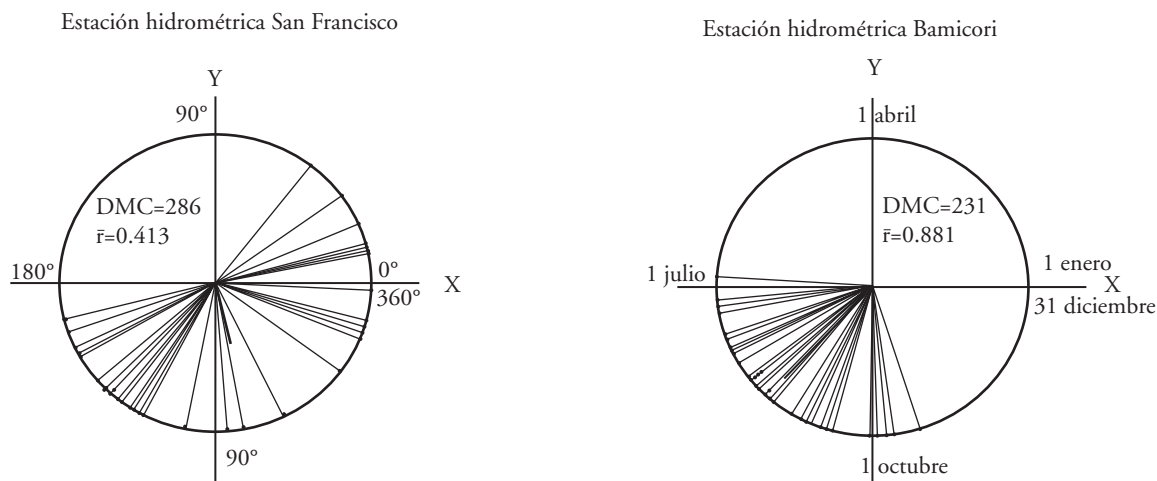


Figura 2. Fechas de ocurrencia de las crecientes y de los índices de estacionalidad en las estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica Núm. 10 (Sinaloa).

Figure 2. Dates of occurrence of flood and seasonal indexes in gauging stations of Hydrologic Region No. 10 (Sinaloa).

Índices de disimilitud estacional (IDE)

La aplicación de la ecuación 5 entre cada estación (*i*) (Cuadro 1) y las restantes (*j*), definió sus IDE. El Cuadro 4 incluye las estaciones del Cuadro 1 tomadas como base y sus 20 estaciones auxiliares en orden progresivo de desemejanza y los IDE mínimo (número de orden 1) y máximo (número de orden 20). Con base en tal información se definieron las estaciones auxiliares que formarán las regiones de influencia de cada estación base (IDE menores, de izquierda a derecha un número de estaciones menor o igual a 20 del Cuadro 4).

Definición de las regiones de influencia

Ocho de las 21 cuencas con tamaños superiores a los 5000 km² presentan fechas promedio tardías de ocurrencia de crecientes (DMC), de finales de septiembre a principios de noviembre, así como índices de estacionalidad ($\bar{r}$) bajos o medios, que varían de 0.3405 a 0.6214 con valor medio de 0.4619, que indica un grado de estacionalidad bajo (Cuadro 1). Estas cuencas se ubican en la zona montañosa de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), o bien, gran parte de su área es de topografía accidentada, como Jaina, Santa Cruz e Ixpalino. Al contrario, el resto de las cuencas, las menores de 2000 km² tienen su DMC

Definition of regions of influence

Eight of the 21 watersheds of more than 5000 km² have average late dates of flood occurrence (DMC), from late September to early November, and low or medium seasonality indices ($\bar{r}$), ranging from 0.3405 to 0.6214 with a mean value of 0.4619, indicating a low degree of seasonality (Table 1). These watersheds are located in the mountainous area of Hydrologic Region No. 10 (Sinaloa); its largest area is hilly, like Jaina, Santa Cruz and Ixpalino. In contrast, the rest of the watersheds, the smaller ones of 2000 km² have their (DMC) occurrence in late August and early September and their seasonal index is typically greater than 0.70. Due to the occurrence of these two groups of watersheds and the small number of those that could be processed (21) for their unaffected hydrologic regime, it was considered convenient to define the regions of influence with five auxiliary watersheds. For example, for Chinipas as base watershed, its subsidiaries are (Table 4): Jaina, San Francisco, Santa Cruz, Badiraguato and Huites; while the subsidiaries for El Quelite are: Acatitán, La Tina, Naranjo, Choix and Zopilote.

As the regions of influence were integrated by seasonal dissimilarity of their floods and not by the statistical similarity of their records, then it was considered advisable not to use the weighting

Cuadro 4. Números de las estaciones auxiliares que forman la región de influencia de la estación base indicada, de acuerdo al índice de disimilitud estacional (IDE) de sus crecientes anuales.**Table 4. Number of auxiliary stations making up the region of influence of the base station indicated, according to the seasonal dissimilarity index (IDE) of their annual floods.**

Estación Base:	Orden decreciente de las estaciones auxiliares (número según primera columna) que forman la región de influencia:																			
	1 [†]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20 [‡]
1 Chinipas	8 (0.101)	3	18	13	4	2	20	16	12	19	5	7	9	21	11	10	14	17	15	6 (0.601)
2 Palo Dulce	4 (0.034)	3	12	1	8	18	20	13	16	19	5	9	7	21	11	14	10	17	15	6 (0.776)
3 San Francisco	4 (0.067)	2	1	8	18	12	20	13	16	19	5	7	9	21	11	10	14	17	15	6 (0.721)
4 Huites	2 (0.034)	3	12	1	18	8	20	13	16	19	5	7	9	21	11	10	14	17	15	6 (0.779)
5 Choix	9 (0.016)	7	11	16	14	10	21	19	17	15	13	6	1	8	20	18	3	4	2	12 (0.656)
6 Bamícori	15 (0.065)	17	14	10	11	9	5	7	21	19	16	13	1	8	20	18	3	2	4	12 (0.911)
7 La Tina	9 (0.033)	5	11	21	19	10	14	16	17	15	13	6	1	8	20	18	3	4	2	12 (0.666)
8 Jaina	18 (0.067)	20	1	3	13	4	2	16	12	19	5	7	9	21	11	10	14	17	15	6 (0.635)
9 Naranjo	5 (0.016)	7	11	10	14	21	16	17	19	15	13	6	1	8	20	18	3	4	2	12 (0.670)
10 Zopilote	17 (0.028)	14	11	15	9	7	6	5	21	19	16	13	1	8	20	18	3	4	2	12 (0.805)
11 Guamuchil	9 (0.069)	5	14	7	10	17	15	6	21	16	19	13	1	8	20	18	3	2	4	12 (0.727)
12 La Huerta	4 (0.136)	2	3	18	8	1	20	13	16	19	5	7	9	21	11	10	14	17	15	6 (0.911)
13 Badiraguato	16 (0.104)	8	1	19	20	18	7	5	9	21	3	11	4	2	10	14	17	15	12	6 (0.488)
14 Chico Ruiz	17 (0.031)	10	11	15	6	9	7	5	21	19	16	13	1	8	20	18	3	4	2	12 (0.807)
15 Pericos	6 (0.065)	14	17	10	11	9	5	7	21	16	19	13	1	8	20	18	3	2	4	12 (0.855)
16 Tamazula	13 (0.104)	5	7	9	19	1	21	11	8	20	10	14	18	17	3	15	4	2	6	12 (0.518)
17 El Bledal	10 (0.028)	14	15	6	11	9	7	5	21	19	16	13	1	8	20	18	3	4	2	12 (0.829)
18 Santa Cruz	8 (0.067)	20	3	1	4	13	2	12	16	19	21	7	5	9	11	10	14	17	15	6 (0.696)
19 Acatitán	21 (0.075)	7	16	9	5	13	11	10	14	17	20	8	1	15	18	6	3	4	2	12 (0.616)
20 Ixpalino	18 (0.081)	8	13	1	3	4	16	2	19	12	21	7	5	9	11	10	14	17	15	6 (0.659)
21 El Quelite	19 (0.075)	7	9	5	10	11	17	14	16	13	15	6	21	8	1	18	3	4	2	12 (0.689)

[†] Índice de disimilitud estacional más bajo; [‡]Índice de disimilitud estacional más alto ♦ [†]Lowest seasonal dissimilarity index; [‡]highest seasonal dissimilarity index.

hacia finales de agosto y principios de septiembre y su índice de estacionalidad es comúnmente superior a 0.70. Debido a la ocurrencia de estos dos grupos de cuencas y al número reducido de las que fue posible procesar (21), por su régimen hidrológico no afectado, se consideró conveniente definir las regiones de influencia con cinco cuencas auxiliares. Por ejemplo, para Chinipas como cuenca base, sus auxiliares son (Cuadro 4): Jaina, San Francisco, Santa Cruz, Badiraguato y Huites; en cambio, para El Quelite sus estaciones hidrométricas auxiliares son: Acatitán, La Tina, Naranjo, Choix y Zopilote.

Como las regiones de influencia fueron integradas por disimilitud estacional de sus crecientes y no por semejanza estadística de sus registros, entonces también se consideró conveniente no emplear la función de ponderación (Burn, 1990; Campos, 2008) al aplicar los métodos regionales.

function (Burn, 1990; Campos, 2008) on applying regional methods.

The DMC variability (Table 1) fluctuated from 230.5 in Pericos station to 312.3 in La Huerta, coinciding with the overall or *temporary* results of the geographical area of México observed by Ramírez *et al.* (2009).

CONCLUSIONS

In the definition of the regions of influence, five auxiliary stations were adopted, due to the limited availability of records (only 21) and the two groups of watersheds previously established according to their seasonal indices ($\bar{r}$):

- 1) Those of late date of flood occurrence and low or medium index of seasonality are those of watersheds of more than 5,000 km², and are located in the mountainous area of Hydrological

La variabilidad de DMC (Cuadro 1) fluctuó de 230.5, en la estación Pericos, a 312.3 en la estación La Huerta, coincide con los resultados globales o de temporalidad de la zona geográfica de México observada por Ramírez *et al.* (2009).

CONCLUSIONES

En la definición de las regiones de influencia se adoptó un número fijo de estaciones auxiliares de cinco, debido a la disponibilidad escasa de registros (sólo 21) y al establecimiento previo de dos grupos de cuencas de acuerdo a sus índices de estacionalidad ($\bar{r}$):

- 1) Las de fecha tardía de ocurrencia de crecientes e índice de estacionalidad bajo o medio, son las de tamaño de cuenca mayor de 5000 km² y se localizan en las zona montañosa de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa). A este grupo pertenecen Palo Dulce, San Francisco, Huites, Jaina, La Huerta, Santa Cruz e Ixpalino.
- 2) Aquéllas cuya fecha promedio de ocurrencia de crecientes está ubicada hacia finales de agosto o principios de septiembre y cuyo índice de estacionalidad, en general, es mayor de 0.70, es decir presentan estacionalidad fuerte, son pequeñas, por lo general menores de 2,000 km². En este grupo están Bamícori, Zopilote, Chico Ruiz, Pericos, El Bledal y El Quelite.

AGRADECIMIENTOS

Los comentarios de dos árbitros anónimos y de el editor son bienvenidos porque permitieron que el estudio sea más explícito.

LITERATURA CITADA

- Burn, D. H. 1990. An appraisal of the "region of influence" approach to flood frequency analysis. *Hydrol. Sci. J.* 35: 149-165.
- Burn, D. H. 1997. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *J. Hydrol.* 202: 212-230.

Region No. 10 (Sinaloa). Palo Dulce, San Francisco, Huites, Jaina, La Huerta, Santa Cruz and Ixpalino belong to this group.

- 2) Those whose mean date of flood occurrence takes place towards the end of August or early September and whose level of seasonality, in general, is greater than 0.70, i.e., exhibit strong seasonality, are small, usually less than 2,000 km². In this group are Bamícori, Zopilote, Chico Ruiz, Pericos, El Bledal and El Quelite.

—End of the English version—

-----*

- Campos-Aranda, D. F. 2008. Estudio de la precipitación máxima diaria anual en 53 estaciones pluviométricas del estado de San Luis Potosí, mediante el enfoque de región de influencia. *Ing. Hidrául. Méx.* XXIII: 139-155.
- Cunderlik, J. M. and Burn, D. H. 2002. The use of flood regime information in regional flood frequency analysis. *Hydrol. Sci. J.* 47: 77-92.
- GREHYS (Groupe de Recherche en Hydrologie Statistique). 1996. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.* 186: 63-84.
- Hosking, J. R. M. and Wallis, J. R. 1997. Identification of homogeneous regions. *In: Regional Frequency Analysis. An approach based on L-moments.* Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. pp. 54-72.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2002. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). 8 CD's. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos.
- Ouarda, T. B. M. J., Girard, C., Cavadias, G. S. and Bobée, B. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *J. Hydrol.* 24: 157-173.
- Ramírez-Orozco, A. I., Gutiérrez-López, A. y Ruiz-Silva, H. L. 2009. Análisis de la ocurrencia en el tiempo de los gastos máximos en México. *Ing. Hidrául. Méx.* XXIV: 115-124.
- SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1975. Boletín Hidrológico No. 36. Tomos I y VI. Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa). Dirección de Hidrología. México, D.F.
- Soto-Cortés, G y Escalante-Sandoval, C. 1999. Inferencia y pronóstico de eventos con base en la teoría de los subconjuntos borrosos. *Ing. Hidrául. Méx.* XIV: 5-17.
- Zrinji, Z. and Burn, D. H. 1996. Regional flood frequency with hierarchical region of influence. *J. W. Res. Plann. Manag.* 122: 245-252.