

Definición de tres épocas de crecientes utilizando estadísticos direccionales

• Daniel Francisco Campos-Aranda •

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

*Autor para correspondencia

Resumen

Campos-Aranda, D. F. (enero-febrero, 2017). Definición de tres épocas de crecientes utilizando estadísticos direccionales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 155-165.

El establecimiento de tres épocas o temporadas de las crecientes de un río, con base en las fechas de ocurrencia de sus magnitudes anuales, tiene diversas aplicaciones prácticas, como la estimación de los gastos de diseño estacionales, la operación óptima de los embalses y el manejo eficiente de sus sistemas hídricos asociados, entre ellos, las planicies de inundación generadas por su almacenamiento o descargas. Actualmente, los índices de estacionalidad o temporalidad de las crecientes anuales son un método común que permite estudiar de forma apropiada su comportamiento estacional. En este trabajo se describe con detalle un método basado en los estadísticos direccionales, el cual permite definir racional y objetivamente tres épocas de crecientes, la *previa*, la *principal* y la *posterior*, con base en la desviación estándar circular. El método se aplica a los registros de crecientes anuales de las estaciones hidrométricas *Guamúchil* y *Huites* de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa). El análisis de los resultados destaca la sencillez y exactitud del procedimiento cuando se estudia un río con gran temporalidad y se define una *época dominante* de crecientes, así como las dificultades para establecer las épocas de crecientes en un río con baja estacionalidad, que presenta dos temporadas de crecientes: la de invierno, con pocos eventos extremos, pero los de mayor magnitud, y viceversa en la de verano. Las conclusiones recomiendan la aplicación sistemática del método debido a que ayuda notablemente en la visualización y entendimiento del comportamiento estacional de las crecientes de un río.

Palabras clave: crecientes estacionales, estadísticos direccionales, índices de estacionalidad, desviación estándar circular, coordenadas ponderadas, estaciones hidrométricas *Guamúchil* y *Huites*.

Abstract

Campos-Aranda, D. F. (January-February, 2017). Definition of three flood seasons using directional statistics. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(1), 155-165.

Establishing three seasons or spells in river floods, based on the dates of occurrence of annual magnitudes, has several practical applications such as: estimating seasonal flows design, the optimal operation of reservoirs and the efficient management of associated water systems like floodplains generated by their storage or discharge. Nowadays, seasonality or temporality indices of annual floods are a common method to properly study their seasonal behavior. In this paper a method based on directional statistics is described in detail which allows the rational and objective definition of three flood season (FS), the pre-FS, the main-FS and the post-FS, based on circular standard deviation. The method is applied to records of annual floods of hydrometric stations *Guamúchil* and *Huites* of the Hydrological Region No. 10 (Sinaloa). The analysis of the results pointed out the simplicity and accuracy of the procedure when a river with great seasonality is studied and a flood dominant season can be defined. Accordingly, the difficulties to set the flood seasons in a river with low seasonality having two flood seasons (the winter with few extreme events but of greater magnitude and vice versa in the summer) are highlighted. Conclusions recommend the systematic application of the method, because it helps greatly on visualizing and understanding the seasonal behavior of floods in a river.

Keywords: Seasonal floods, directional statistics, seasonality indices, circular standard deviation, weighted coordinates, and *Guamúchil* and *Huites* hydrometric stations.

Recibido: 10/02/2015
Aceptado: 3/03/2016

Introducción

Las variaciones estacionales o por épocas que tienen las lluvias de una cuenca son el factor principal que origina la variabilidad de su escurrimiento tanto en el volumen mensual como en la magnitud de sus crecientes. Una definición adecuada de la *estacionalidad de las crecientes* es muy importante, pues tiene aplicaciones prácticas en ciertos diseños hidrológicos y en el manejo de los recursos hídricos, como lo han detallado Black y Werritty (1997); McCuen y Beightley (2003); Cunderlik, Ouarda y Bobée (2004); Chen, Guo, Yan, Liu y Fang (2010), y Campos-Aranda (2014b).

La segmentación de la ocurrencia de las crecientes en varias subestaciones, temporadas o épocas es útil en la planeación y manejo de los embalses de múltiples propósitos. En China, en la cuenca del río Yangtze, las crecientes anuales y las más grandes ocurridas se concentran sólo en una cierta época del año, y las crecientes medianas y pequeñas se presentan en el resto del tiempo (Liu *et al.*, 2015). Por ello, Chen *et al.* (2010); Liu, Guo, Xiong y Chen (2010), y Liu *et al.* (2015) sugieren dividir la estación de ocurrencia de las crecientes en tres épocas, la *previa*, la *principal* y la *posterior*, para usar diferentes niveles máximos en el embalse que dejen libre en cada temporada el volumen de control necesario según las crecientes máximas o de diseño de tal época. Este manejo del embalse puede aportar beneficios, sin un incremento del riesgo, en la generación de energía hidroeléctrica, en el uso de la capacidad útil, en la navegación y definición de las áreas libres de inundación en las inmediaciones del almacenamiento.

Existen básicamente tres enfoques para definir las épocas de crecientes: (1) el basado en el análisis probabilístico de los datos; (2) el que analiza los fenómenos meteorológicos y/o climatológicos que originan las crecientes, y (3) el que emplea ciertas características de temporalidad asociadas con las crecientes. Ejemplos del primer enfoque se pueden consultar en McCuen y Beightley (2003); Durrans, Eiffé, Thomas Jr., y

Goranflo (2003); Fang, Guo, Wang, Liu y Xiao (2007), y Campos-Aranda (2014b). Del segundo enfoque, en Black y Werritty (1997), y Singh, Wang y Zhang (2005). Del tercer enfoque, en Cunderlik *et al.* (2004), Chen *et al.* (2010); Koutroulis, Tsanis y Daliakopoulos (2010), y Köplin, Schädler, Viviroli & Weingartner (2014).

El objetivo de este trabajo consiste en exponer con detalle el método recientemente sugerido por Chen, Singh, Guo, Fang y Liu (2013), que pertenece al tercer enfoque, pues está basado en los estadísticos direccionales; además, se aplica tal criterio a los datos disponibles antes de la construcción de los embalses *Guamúchil* (Eustaquio Buelna) y *Huites* (Luis Donald Colosio) de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa), para establecer sus tres épocas de crecientes: previa, principal y posterior, bajo dos enfoques de uso de la información hidrométrica disponible.

Materiales y métodos

Estadísticos direccionales (índices de estacionalidad)

Cuando un dato no es escalar sino angular o direccional, tal valor puede ser representado como un *dato circular* y teniendo varios de ellos se pueden obtener sus *estadísticos direccionales* que los describen. La teoría que respalda tales estimaciones data de principios de la década de 1970 y constituye una herramienta simple para obtener medidas de similitud procedentes de las fechas de ocurrencia de los eventos extremos hidrológicos, como las crecientes o avenidas máximas. Existen diversas convenciones o formas de usar el círculo para estimar los estadísticos direccionales (Ramírez-Orozco, Gutiérrez-López, & Ruiz-Silva, 2009); en adelante se usará la empleada por Burn (1997), por su semejanza con los cuadrantes cartesianos. En tal esquema, el avance es contrario a las manecillas del reloj, iniciando en el eje de las abscisas; por ello, el 1 de enero y el 31 de diciembre coinciden en tal inicio. En cambio, Chen *et al.* (2013) ponen en tales fechas el inicio y el final de la temporada de crecientes.

Para establecer los *índices de estacionalidad* ($\bar{\alpha}$, DMC y \bar{r}) se comienza por transformar cada fecha de ocurrencia de las crecientes anuales a día juliano (D_i); es decir, de 0 a 365. Lo anterior implica no considerar los años bisiestos. Las fechas de enero quedan igual, pero 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. Enseguida se obtiene el ángulo α_i en radianes correspondiente a la fecha i de cada creciente (D_i), con la expresión siguiente:

$$\alpha_i = 2\pi \frac{D_i}{365} \quad (1)$$

en la cual, π es número pi, con 3.1415927 como valor aproximado. En seguida, las coordenadas x y y de las fechas de ocurrencia de las crecientes descritas por los ángulos α_i se estiman con base en los cosenos y senos, y se obtienen sus valores medios, según las ecuaciones siguientes:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i) \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i) \quad (3)$$

siendo n el número de fechas de crecientes anuales analizadas. Ahora, la dirección media ($\bar{\alpha}$) de la fecha promedio de las crecientes será:

$$\bar{\alpha} = \arctan \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right) \quad (4)$$

La aplicación de la ecuación anterior se realiza obteniendo primero el arco tangente de \bar{y} entre \bar{x} , ambas con signo positivo, denominado α , en radianes; entonces, si \bar{x} y \bar{y} son positivas, $\bar{\alpha} = \alpha$; si $\bar{x} < 0$ y $\bar{y} > 0$ $\bar{\alpha} = \pi - \alpha$; si ambas son negativas, $\bar{\alpha} = \pi + \alpha$, y por último, si $\bar{x} > 0$ y $\bar{y} < 0$ $\bar{\alpha} = 2\pi - \alpha$. El valor de $\bar{\alpha}$ en día juliano, denominado *día medio de las crecientes* (DMC), se obtiene primero dividiendo entre 2π y después

multiplicando por 365. 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. Lógicamente, el DMC estará relacionado con el tamaño de la cuenca y con su localización geográfica dentro de la región hidrológica estudiada.

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:

$$\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (5)$$

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-Orozco *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 $\bar{r} < 0.10$. Chen *et al.* (2013) indican que si \bar{r} es cercano a la unidad, se puede esperar que una sola temporada o época de crecientes sea dominante.

Estadísticos direccionales aplicados (primer método)

Chen *et al.* (2013) proponen utilizar la desviación estándar circular (σ) para dividir la temporada de crecientes en tres épocas. Tal estadístico está relacionado con la desviación circular (S), según la expresión siguiente:

$$1 - S = e^{-\frac{1}{2}\sigma^2} \quad (6)$$

S es un estadístico de dispersión común definido en términos de la longitud del vector resultante estandarizado, es decir:

$$S = 1 - \bar{r} \quad \text{con} \quad 0 \leq S \leq 1 \quad (7)$$

Combinando las ecuaciones (5) y (6) se obtiene la desviación estándar circular:

$$\sigma = \sqrt{-2 \ln \bar{r}} \quad (8)$$

Finalmente, los días de inicio (*DIC*) y terminación (*DTC*) de la temporada o *época principal de crecientes*, en día juliano, serán (Chen *et al.*, 2013):

$$DIC = \frac{365 \cdot (\bar{\alpha} - \sigma)}{2\pi} \quad (9)$$

$$DTC = \frac{365 \cdot (\bar{\alpha} + \sigma)}{2\pi} \quad (10)$$

Las tres temporadas o épocas de crecientes se definen de la manera siguiente: (1) la *previa* abarca del primero de enero hasta el *DIC*; (2) la *principal* comprende del *DIC* hasta el *DTC*, y (3) la *posterior* se desarrolla del *DTC* hasta el 31 de diciembre. Chen *et al.* (2013) definen inicialmente, con base en los datos, el inicio y fin de temporada de crecientes y le llaman *T*, valor que usan en lugar de 365 en las ecuaciones (1), (9) y (10).

Estadísticos direccionales aplicados (segundo método)

Chen *et al.* (2013) sugieren *ponderar* las coordenadas *x* y *y* de cada ángulo α_i por los valores del gasto máximo anual (q_i) de cada creciente. Las nuevas resultantes del ángulo medio ($\bar{\alpha}$) serán:

$$\bar{x}_p = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \cos(\alpha_i) \quad (11)$$

$$\bar{y}_p = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \sen(\alpha_i) \quad (12)$$

en las cuales *Q* es la variable que permite la ponderación con la media de cada gasto q_i . Su expresión es:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (13)$$

Después se repite la aplicación de las ecuaciones (4) a (10). Lógicamente, este enfoque debe aumentar la dispersión en el índice de estacionalidad (\bar{r}), pues ahora las longitudes de cada radio relativo a una fecha de creciente no son unitarias, sino que tiene una dimensión igual a $q_i/(Q/n)$.

Chen *et al.* (2013) concluyen que ambos métodos de uso de los estadísticos direccionales para definir las tres épocas de crecientes son confiables y objetivos, mejorando su desempeño conforme el registro disponible de fechas de ocurrencia de crecientes aumenta. Lo anterior se demostró con base en una experimentación con datos sintéticos y verificado con datos reales del embalse Geheyan sobre el río Qing, afluente del Yangtze y del embalse Baishan en el río Songhua, el tercero más grande de China. Estos embalses, uno al sur y el otro al norte de China, han sido recientemente estudiados por Chen *et al.* (2015), con un enfoque similar al de este trabajo.

Crecientes y sus fechas de ocurrencia en las estaciones hidrométricas Guamúchil y Huites

La estación de aforos *Guamúchil* sobre el río Mocerito de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa) tiene por clave la 10031 en el sistema *BANDAS* (IMTA, 2003), su área drenada es de 1 645 km² y su registro abarca de 1940 a 1971 ($n = 32$), en que comenzó la construcción de la presa Eustaquio Buelna (Aldama, Ramírez, Aparicio, Mejía & Ortega, 2006). La cuenca de esta estación se ubica al centro de la región hidrológica, colindando al noreste con la cuenca del río Badiraguato, que drena a la presa Adolfo López Mateos. La estación hidrométrica y la presa Eustaquio Buelna se localizan en la planicie

costera de la región hidrológica. Del CD-1 del sistema BANDAS se obtuvo la información de gastos máximos anuales, que incluye gasto, año, mes, día, hora y lectura de escala. En el cuadro 1 se han concentrado los datos de

gastos y fechas de ocurrencia en sus primeras cinco columnas.

La estación de aforos *Huites* sobre el río Fuerte de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa) tiene por clave la 10037 en el sistema

Cuadro 1. Crecientes anuales y sus fechas de ocurrencia en la estación hidrométrica *Guamúchil*, así como su procesamiento para obtener los índices de estacionalidad ($\bar{\alpha}$, DMC y \bar{r})

Núm.	Año	Gasto (m ³ /s)	Mes	Día	Día juliano	α_i (grados)	x_i	y_i
1	1940	255	Ago	4	216	213.04	-0.8383	-0.5452
2	1941	65	Sep	22	265	261.37	-0.1501	-0.9887
3	1942	445	Oct	2	275	271.23	0.0215	-0.9998
4	1943	1 550	Sep	26	269	265.32	-0.0817	-0.9967
5	1944	392	Ago	30	242	238.68	-0.5197	-0.8543
6	1945	916	Oct	8	281	277.15	0.1245	-0.9922
7	1946	241	Ago	10	222	218.96	-0.7776	-0.6288
8	1947	530	Ago	12	224	220.93	-0.7555	-0.6552
9	1948	648	Jul	23	204	201.21	-0.9323	-0.3617
10	1949	375	Ene	22	22	21.70	0.9291	0.3697
11	1950	272	Ago	16	228	224.88	-0.7086	-0.7056
12	1951	422	Sep	7	250	246.58	-0.3975	-0.9176
13	1952	377	Ago	5	217	214.03	-0.8288	-0.5596
14	1953	1 173	Sep	17	260	256.44	-0.2345	-0.9721
15	1954	219	Jul	10	191	188.38	-0.9893	-0.1458
16	1955	3 507	Sep	23	266	262.36	-0.1330	-0.9911
17	1956	165	Jun	27	178	175.56	-0.9970	0.0774
18	1957	526	Ago	18	230	226.85	-0.6939	-0.7296
19	1958	1 014	Sep	20	263	259.40	-0.1840	-0.9829
20	1959	1 610	Ago	2	214	211.07	-0.8566	-0.5161
21	1960	1 373	Ene	13	13	12.82	0.9751	0.2219
22	1961	525	Ago	1	213	210.08	-0.8653	-0.5012
23	1962	985	Oct	4	277	273.21	0.0559	-0.9984
24	1963	460	Jul	26	207	204.16	-0.9124	-0.4094
25	1964	390	Ago	26	238	234.74	-0.5773	-0.8165
26	1965	449	Jul	27	208	205.15	-0.9052	-0.4250
27	1966	794	Jul	27	208	205.15	-0.9052	-0.4250
28	1967	720	Ago	22	234	230.79	-0.6321	-0.7749
29	1968	200	Feb	10	41	40.44	0.7611	0.6486
30	1969	312	Sep	9	252	248.55	-0.3657	-0.9307
31	1970	520	Sep	15	258	254.47	-0.2678	-0.9635
32	1971	1 045	Ago	15	227	223.89	-0.7207	-0.6933
Suma		22 475.0	-	-	-	-	-13.35277	-19.16315
Promedio		702.3	-	-	-	-	-0.41727	-0.59885
Índices de Estacionalidad		$\alpha = 55.1^\circ$	$\bar{\alpha} = 235.1^\circ$		DMC = 238.4 (Agosto 26)		$\bar{r} = 0.7299$	

BANDAS (IMTA, 2003); su área drenada es de 26 057 km² y su registro abarca de 1942 a 1992 ($n = 51$), en que comenzó la construcción de la presa Luis Donaldo Colosio (Aldama *et al.*, 2006). El río Fuerte está formado por dos colectores principales: el río Chinipas y el río San Miguel; este último tiene un colector importante, que es el río Urique, cuya cuenca colinda con la Región Hidrológica 24-1 del río Conchos. La cuenca del río Chinipas es la más septentrional de la región y colinda con

la región Hidrológica 9 del río Yaqui. Esta cuenca es montañosa y como han indicado Aldama *et al.* (2006), sus crecientes anuales definen dos temporadas: la del verano, de principios de junio a mediados de septiembre, y la de invierno, de mediados de diciembre a principios de marzo. También del CD-1 del sistema *BANDAS* se obtuvo la información de gastos máximos anuales y sus fechas de ocurrencia, la cual se tiene en las primeras cinco columnas del cuadro 2.

Cuadro 2. Crecientes anuales y sus fechas de ocurrencia en la estación hidrométrica *Huütes*, así como su procesamiento para obtener los índices de estacionalidad ($\bar{\alpha}$, DMC y \bar{r}).

Núm.	Año	Gasto (m ³ /s)	Mes	Día	Día juliano	α_i (grados)	x_i	y_i
1	1942	2 531	Ago	19	231	227.84	-0.6713	-0.7412
2	1943	14 376	Dic	9	343	338.30	0.9291	-0.3697
3	1944	2 580	Feb	27	58	57.21	0.5416	0.8406
4	1945	1 499	Jul	30	211	208.11	-0.8820	-0.4712
5	1946	1 165	Ago	30	242	238.68	-0.5197	-0.8543
6	1947	1 127	Ago	29	241	237.70	-0.5344	-0.8452
7	1948	3 215	Feb	5	36	35.51	0.8140	0.5808
8	1949	10 000	Ene	15	15	14.79	0.9668	0.2554
9	1950	3 229	Ene	13	13	12.82	0.9751	0.2219
10	1951	677	Dic	14	348	343.23	0.9575	-0.2885
11	1952	1 266	Ago	14	226	222.90	-0.7325	-0.6808
12	1953	1 025	Jul	22	203	200.22	-0.9384	-0.3456
13	1954	955	Ago	19	231	227.84	-0.6713	-0.7412
14	1955	4 780	Ene	15	15	14.79	0.9668	0.2554
15	1956	696	Ago	23	235	231.78	-0.6187	-0.7857
16	1957	593	Oct	5	278	274.19	0.0731	-0.9973
17	1958	3 010	Sep	21	264	260.38	-0.1670	-0.9859
18	1959	1 908	Oct	3	276	272.22	0.0387	-0.9993
19	1960	15 000	Ene	12	12	11.84	0.9787	0.2051
20	1961	1 396	Ene	24	24	23.67	0.9159	0.4015
21	1962	1 620	Oct	5	278	274.19	0.0731	-0.9973
22	1963	2 702	Dic	12	346	341.26	0.9470	-0.3213
23	1964	1 319	Ago	1	213	210.08	-0.8653	-0.5012
24	1965	1 944	Dic	23	357	352.11	0.9905	-0.1373
25	1966	2 420	Ago	19	231	227.84	-0.6713	-0.7412
26	1967	2 506	Dic	16	350	345.21	0.9668	-0.2554
27	1968	1 534	Ago	1	213	210.08	-0.8653	-0.5012
28	1969	1 508	Jul	17	198	195.29	-0.9646	-0.2637
29	1970	1 558	Ago	13	225	221.92	-0.7441	-0.6681
30	1971	2 200	Oct	26	299	294.90	0.4211	-0.9070
31	1972	2 225	Nov	24	328	323.51	0.8039	-0.5947

Cuadro 2 (continuación). Crecientes anuales y sus fechas de ocurrencia en la estación hidrométrica *Huites*, así como su procesamiento para obtener los índices de estacionalidad ($\bar{\alpha}$, DMC y \bar{r}).

32	1973	7 960	Feb	22	53	52.27	0.6119	0.7909
33	1974	3 790	Sep	24	267	263.34	-0.1159	-0.9933
34	1975	1 095	Sep	5	248	244.60	-0.4289	-0.9034
35	1976	2 677	Oct	24	297	292.93	0.3896	-0.9210
36	1977	1 135	Sep	1	244	240.66	-0.4900	-0.8717
37	1978	4 790	Sep	27	270	266.30	-0.0645	-0.9979
38	1979	6 860	Ene	25	25	24.66	0.9088	0.4172
39	1980	1 496	Sep	7	250	246.58	-0.3975	-0.9176
40	1981	4 828	Oct	9	282	278.14	0.1415	-0.9899
41	1982	2 450	Oct	1	274	270.25	0.0043	-0.9999
42	1983	8 275	Mar	4	63	62.14	0.4674	0.8841
43	1984	5 580	Dic	15	349	344.22	0.9623	-0.2720
44	1985	3 585	Ene	25	25	24.66	0.9088	0.4172
45	1986	1 349	Jul	17	198	195.29	-0.9646	-0.2637
46	1987	1 429	Jul	31	212	209.10	-0.8738	-0.4863
47	1988	1 866	Jul	11	192	189.37	-0.9867	-0.1628
48	1989	1 869	Feb	2	33	32.55	0.8429	0.5380
49	1990	11 559	Dic	29	363	358.03	0.9994	-0.0344
50	1991	2 563	Dic	21	355	350.14	0.9852	-0.1713
51	1992	2 025	Ene	12	12	11.84	0.9787	0.2051
Suma		169 745	-	-	-	-	6.39314	-17.96632
Promedio		3 328.3	-	-	-	-	0.12536	-0.35228
Índices de estacionalidad		$\alpha = 70.4^\circ$	$\bar{\alpha} = 289.6^\circ$	$DMC = 293.6$ (octubre 21)			$\bar{r} = 0.3739$	

Resultados y discusión

Cálculo de los índices de estacionalidad

Aplicando las ecuaciones (1) a (5) a los datos de la sexta columna de los cuadros 1 y 2 se obtienen los índices de estacionalidad que se muestran al final de cada tabulación. Los resultados de la ecuación (1) se tienen en radianes, pero conviene expresar cada ángulo α_i en grados para facilidad de construcción de los gráficos de fechas de ocurrencia de las crecientes, mostrados en las figuras 1 y 2. Lo anterior, con sólo multiplicar por 57.29578, que es la equivalencia de un radián a grados. Los ejes x , y de las figuras 1 y 2 muestran las dos simbologías comúnmente usadas en estos gráficos: la de día con mes respectivo y la de grados de la circunferencia.

Las crecientes anuales en la estación hidrométrica *Guamúchil* son bastante estacionales, definiendo prácticamente una sola época, que va del 27 de junio al 8 de octubre; la primera fecha procede de la creciente número 17 de 1956 y la segunda de la creciente 6 de 1945, ambas del cuadro 1. Ocurrieron sólo tres crecientes invernales, como se muestra en la figura 1, en 1960, 1949 y 1968. Dicha estacionalidad o temporalidad se ve reflejada en el índice \bar{r} , con un valor aproximado de 0.730, que la define como *fuerte*. El día medio de las crecientes (DMC) ocurre en el tercer cuadrante y le corresponde la fecha del 26 de agosto. En la figura 1 es el radio más grueso, cuya extensión es \bar{r} y después sigue punteado.

Por el contrario, las crecientes de la estación hidrométrica *Huites* presentan mucha

dispersión, como se observa en la figura 2. Según datos del cuadro 2, la temporada invernal llega hasta el 4 de marzo, fecha en que ocurrió la creciente más tardía en el año de 1983. De la temporada de verano y otoño, la creciente más temprana se presentó el 11 de julio de 1988 y la más tardía el 29 de diciembre de 1990. Esta gran dispersión se ve reflejada en el índice \bar{r} , cuyo valor aproximado de 0.374 la define como estacionalidad *baja*. Su DMC se presenta en el cuarto cuadrante y ocurre el 21 de octubre, es el radio más grueso con aproximadamente dos terceras partes punteadas. Campos-Aranda (2014a) expone los índices estacionales de otras 19 estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa), en relación con un *análisis de regional* de frecuencias de crecientes.

Definición de las épocas de crecientes

En la estación de aforos *Guamúchil*, la dirección media ($\bar{\alpha}$) resultó de 4.1038 radianes y la

desviación estándar circular de 0.7936, según la ecuación (8). Con base en estos resultados, las ecuaciones (9) y (10) definen los siguientes días julianos: $DIC = 192.3$ y $DTC = 284.5$, cuya fechas son, respectivamente, 11 de julio y 12 de octubre, indicadas con líneas punteadas en la figura 1. Para la estación hidrométrica *Huites* se obtuvieron $\bar{\alpha} = 5.0543$ radianes, $\sigma = 1.4027$, $DIC = 212.1$ (31 de julio) y $DTC = 375.1$ (10 de enero), también mostradas con radios punteados en la figura 2. En el cuadro 3 se tienen definidas las fechas de cada una de las tres épocas de crecientes en ambas estaciones hidrométricas de acuerdo con el llamado *Primer método*.

Al trabajar con las ecuaciones (11) y (12) para obtener las coordenadas x y y , que están ponderadas con base en la magnitud del gasto máximo anual, se obtienen en la estación hidrométrica *Guamúchil* $\bar{x}_p = -0.31745$ y $\bar{y}_p = -0.69361$, las cuales conducen a los valores de $\bar{\alpha}$, \bar{r} y σ , mostrados en el cuadro 3, así como a los respectivos valores de DIC y DTC , además de las nuevas fechas de

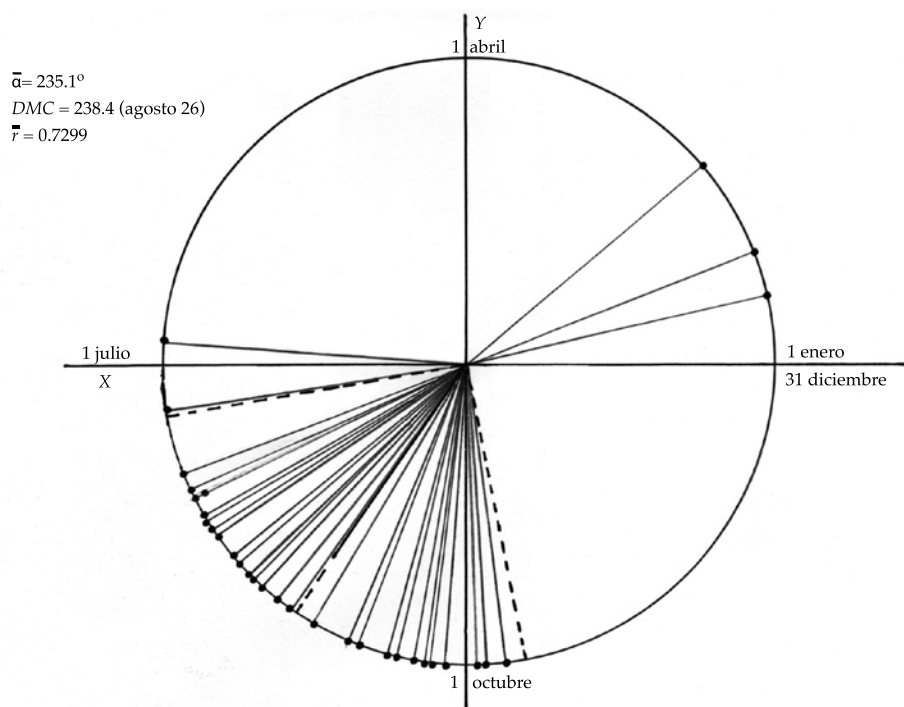


Figura 1. Representación de las fechas de ocurrencia y de los índices de estacionalidad de las crecientes anuales de la estación hidrométrica *Guamúchil* de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

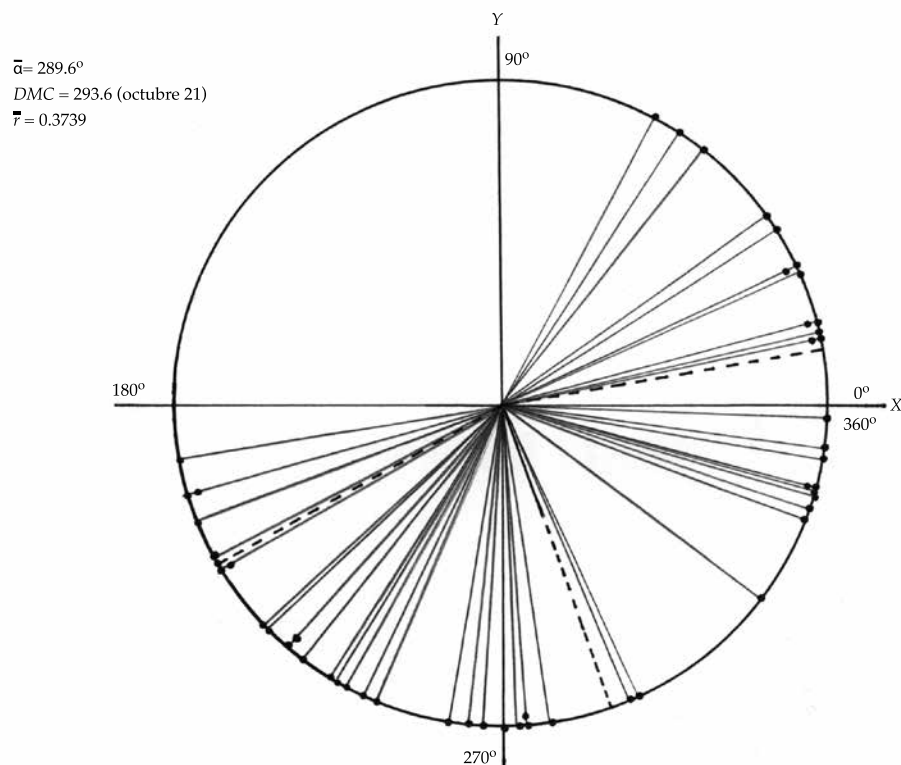


Figura 2. Representación de las fechas de ocurrencia y de los índices de estacionalidad de las crecientes anuales de la estación hidrométrica *Huites* de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

Cuadro 3. Definición de las tres épocas de crecientes en las estaciones hidrométricas *Guamúchil* y *Huites* de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

$\bar{\alpha}$	\bar{r}	σ	DIC	DMC	DTC	Previa	Principal	Posterior
Guamúchil (primer método)								
4.1038	0.7299	0.7936	192.3 11 de julio	238.4 26 de agosto	284.5 12 de octubre	1 de enero a 10 de julio	11 de julio a 12 de octubre	13 de octubre a 31 de diciembre
Guamúchil (segundo método)								
4.2832	0.7628	0.7359	206.1 25 de julio	248.8 6 de septiembre	291.6 19 de octubre	1° de enero a 24 julio	25 de julio a 19 octubre	20 de octubre a 31 de diciembre
Huites (primer método)								
5.0543	0.3739	1.4027	212.1 31 de julio	293.6 21 de octubre	375.1 10 de enero	11 de enero a 30 de julio	31 de julio a 10 de enero	No existe
Huites (segundo método)								
6.0121	0.5080	1.1638	281.6 9 de octubre	349.3 15 de diciembre	416.9 21 de febrero	22 de febrero a 8 de octubre	9 de octubre a 21 de febrero	No existe

inicio y final de cada época de crecientes. En la estación de aforos *Huites*, los respectivos valores ponderados de las coordenadas fueron

$\bar{x}_p = 0.48949$ y $\bar{y}_p = -0.13605$, con las cuales se obtienen los valores de $\bar{\alpha}$, \bar{r} y σ mostrados en el cuadro 3, además de los valores de *DIC* y *DTC*,

con las nuevas fechas de inicio y fin de cada época de crecientes de acuerdo con el *Segundo método*.

Análisis de los resultados

Con fines de comparación de los resultados entre los dos métodos desarrollados por Chen *et al.* (2013), estos autores consideran más exacto su *Segundo método*, ya que con respecto a tal criterio evalúan los errores relativos entre ambos enfoques; lo anterior, respaldado por el hecho de usar la información hidrométrica. En la estación hidrométrica *Guamúchil*, los resultados de los dos métodos son bastante similares al definir el inicio y fin de la temporada o *época principal* de crecientes, según se observa en el cuadro 3. Lo anterior se debe a que la mayoría de las grandes crecientes anuales ocurren en los meses de agosto y septiembre; es decir, dentro de la temporada o época de crecientes (ver cuadro 1). En la estación *Guamúchil*, en su *época previa* de crecientes ocurrieron tres eventos invernales y dos de aparición temprana el 27 de junio de 1956 y el 10 de julio de 1954. En su *época posterior* de crecientes no ocurren eventos, como se observa en la figura 1.

En la estación de aforos *Huites*, la dispersión de sus crecientes es tan grande que no se puede definir una época posterior (ver figura 2 y cuadro 3). Lo anterior se acrecienta aún más en el segundo método debido a dos causas: (1) los gastos máximos anuales de este registro fluctúan notablemente, por ejemplo, en los primeros 20 años ocurren tres eventos muy reducidos en 1957, 1951 y 1956, con valores de 593, 677 y 696 m³/s, respectivamente (ver cuadro 2); en cambio, en 1960, 1943 y 1949 se presentan los tres eventos más extraordinarios, con 15 000, 14 376 y 10 000 m³/s; (2) la mayoría de los grandes gastos anuales, al menos los superiores a la crecienta media (3 328.3 m³/s), suceden principalmente en la temporada invernal, por ejemplo, en 1943, 1949, 1955, 1960, 1973, 1979, 1983-1985 y 1990; sólo 1974 y 1978 tienen eventos importantes en septiembre.

Conclusiones

La definición de las tres épocas de crecientes (*previa, principal y posterior*) con base en los índices estacionales o de temporalidad, y en sus estadísticos direccionales es un procedimiento racional y objetivo, verificado estadística y prácticamente por sus autores (Chen *et al.*, 2013).

En la primera aplicación numérica, en la estación hidrométrica *Guamúchil* de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa), se pudo comprobar la utilidad del método, para definir de una manera objetiva las tres épocas de crecientes; esto, debido a la gran estacionalidad que presentan sus gastos máximos anuales, los cuales incluso definen una *época posterior* sin eventos.

Por el contrario, en la segunda aplicación numérica en la estación de aforos *Huites*, también de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa), la gran dispersión que presentan sus crecientes anuales no permite establecer una época posterior y se termina definiendo una *época sin crecientes* de la segunda quincena de marzo hasta principios de julio, de manera que todo el resto de año es *época principal* de crecientes; en realidad, desde la segunda quincena de julio hasta la primera de marzo, con escasez de eventos en noviembre (ver figura 2 y cuadro 3).

El método expuesto para el establecimiento racional y objetivo de las tres épocas de crecientes de un río es bastante simple y por ello se recomienda su aplicación sistemática en los estudios tendientes a estimar las crecientes estacionales o por temporadas.

Agradecimientos

Se agradece a los tres árbitros anónimos sus observaciones y correcciones, las cuales permitieron volver más explícito el trabajo y ampliar sus antecedentes.

Referencias

- Aldama, A. A., Ramírez, A. I., Aparicio, J., Mejía, R., & Ortega, G. E. (2006). Capítulo 3: Aplicación y Resultados. Presa Eustaquio Buelna, Guamúchil, Sinaloa (pp. 118-125) y presa Luis Donaldo Colosio, Huites, Sinaloa (pp. 134-143). En: *Seguridad hidrológica de las presas en México*.

- Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Black, A. R., & Werritty, A. (1997). Seasonality of flooding: A case study of North Britain. *Journal of Hydrology*, 195(1-4), 1-25.
- Burn, D. H. (1997). Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*, 202(1-4), 212-230.
- Campos-Aranda, D. F. (2014a). Análisis regional de frecuencia de crecientes en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. 1: índices de estacionalidad y regiones de influencia. *Agrociencia*, 48(2), 147-158.
- Campos-Aranda, D. F. (2014b). Estimación probabilística de crecientes estacionales con base en registros mensuales de gasto máximo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 177-187.
- Cunderlik, J. M., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (2004). Determination of flood seasonality from hydrological records. *Hydrological Sciences Journal*, 49(3), 511-526.
- Chen, L., Guo, S., Yan, B., Liu, P., & Fang, B. (2010). A new seasonal design flood method based on bivariate joint distribution of flood magnitude and date of occurrence. *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), 1264-1280.
- Chen, L., Singh, V. P., Guo, S., Fang, B., & Liu, P. (2013). A new method for identification of flood seasons using directional statistics. *Hydrological Sciences Journal*, 58(1), 28-40.
- Chen, L., Singh, V. P., Guo, S., Zhou, J., Zhang, J., & Liu, P. (2015). An objective method for partitioning the entire flood season into multiple sub-seasons. *Journal of Hydrology*, 528, 621-630.
- Durrans, S. R., Eiffe, M. A., Thomas Jr., W. O., & Goranflo, H. M. (2003). Joint Seasonal/Annual Flood Frequency Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(4), 181-189.
- Fang, B., Guo, S., Wang, S., Liu, P., & Xiao, Y. (2007). Non-identical models for seasonal flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 974-991.
- IMTA (2003). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. 8 CD's. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Köplin, N., Schädler, B., Viviroli, D., & Weingartner, R. (2014). Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climatic change. *Hydrological Processes*, 28(4), 2567-2578.
- Koutroulis, A. G., Tsanis, L. K., & Daliakopoulos, L. N. (2010). Seasonality of floods and their hydrometeorology characteristics in the island of Crete. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 90-100.
- Liu, P., Guo, S., Xiong, L., & Chen, L. (2010). Flood season segmentation based on the probability change-point analysis technique. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4), 540-554.
- Liu, P., Li, L., Guo, S., Xiong, L., Zhang, W., Zhang, J., & Xu, C-Y. (2015). Optimal design of seasonal flood limited water levels and its application for the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 527, 1045-1053.
- McCuen, R. H., & Beightley, R. E. (2003). Seasonal flow frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 43-56.
- Ramírez-Orozco, A. I., Gutiérrez-López, A., & Ruiz-Silva, H. L. (2009). Análisis de la ocurrencia en el tiempo de los gastos máximos en México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24(1), 115-124.
- Singh, V. P., Wang, S. X., & Zhang, L. (2005). Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic data. *Journal of Hydrology*, 307(1-4), 175-195.

Dirección institucional del autor

Dr. Daniel Francisco Campos Aranda

Profesor jubilado
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí
 campos_aranda@hotmail.com