

CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS MEDIANTE CURVAS DE SEVERIDAD-ÁREA-FRECUENCIA, EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

• Daniel Francisco Campos-Aranda •
Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Resumen

Este trabajo está integrado en tres partes, en la primera se citan brevemente ideas generales sobre las sequías, hasta llegar a su definición y tipos. En la segunda parte se expone con detalle el procedimiento sugerido para la estimación de las curvas de severidad-área-frecuencia (SAF), y en la tercera parte se describe la aplicación numérica al valle de la ciudad de San Luis Potosí, México. La secuencia propuesta consta de las cinco etapas básicas siguientes: (1) recopilación y selección de registros a utilizar; (2) interpolación espacial de registros; (3) cálculo de los déficits anuales de lluvia; (4) procesamiento probabilístico de los déficits anuales, y (5) construcción de las curvas SAF. Las características temporales y espaciales de las sequías son básicas para entender su comportamiento y evolución dentro de una cuenca o región específica. Usando uno de los índices más simples de caracterización de las sequías y una técnica elemental de ponderado espacial, se establece el procedimiento de estimación regional de las curvas SAF, el cual utiliza la distribución General de Valores Extremos para obtener las predicciones que definen la frecuencia de tales curvas. Por último, se formulan las conclusiones, las cuales destacan la utilidad de las curvas SAF, para la comparación de las sequías de una región con otra y para la interpretación de los años de sequía histórica. También se manifiesta la sencillez del método propuesto y se indica que su primera etapa es la más crítica.

Palabras clave: precipitación mensual, valores medianos, homogeneidad, interpolación espacial, predicciones, distribución GVE.

Introducción

Con el objeto de afrontar de manera racional la escasez de agua, es necesario entender los procesos que gobiernan su ocurrencia y sus causas. En general, la escasez de agua tiene dos orígenes: el primero es natural y se debe a la aridez y a las sequías; el segundo es inducido por las actividades humanas, por ello incluye a la desertificación y a sus demandas o requerimientos hídricos. Las sequías son uno de los desastres naturales más dañinos que ocurren casi cada año en alguna región del mundo; causan, directa o indirectamente, daños económicos, sociales y ambientales. Las sequías son inevitables, pero sus impactos pueden ser mitigados (Mishra y Singh, 2008; Tallaksen y Van Lanen, 2004).

Las sequías son provocadas por los cuatro mecanismos siguientes: (1) sistema océano-atmósfera, (2) anomalías de la temperatura superficial del océano, (3) relaciones tiempo atmosférico-actividad solar, y (4) procesos de origen de los huracanes y sus anomalías. Debido a que los mecanismos anteriores no actúan de manera independiente sino combinada, resulta sumamente difícil el estudio y la predicción de las sequías. De hecho, las sequías son uno de los peligros naturales más complejos y menos entendidos (Mishra y Singh, 2008; Sheffield y Wood, 2011).

Aparte de la complejidad en sus orígenes, las sequías presentan grandes dificultades para cuantificar sus daños, ya que afectan a muchas personas y a diferentes sectores económicos, además de que su extensión

geográfica por lo común es extensa y entonces se complica de forma notable la estimación de sus impactos ambientales y personales. Ante tales dificultades, la investigación sobre sequías se ha orientado a establecer índices y/o procedimientos que intentan definir las, detectarlas y medirlas (Tallaksen y Van Lanen, 2004; Sheffield y Wood, 2011).

Existiendo la necesidad de contrastar las sequías de una región a otra, así como también comparar las diferentes sequías históricas ocurridas en la misma región, Mishra y Singh (2008) han propuesto un enfoque de análisis similar al regional de frecuencia de crecientes, el cual permite estudiar a las sequías en términos de su duración, severidad, extensión espacial y probabilidad de ocurrencia, para construir sus curvas de severidad-área-frecuencia (curvas SAF). El objetivo de este trabajo consiste en exponer con detalle el procedimiento elemental formulado para la estimación de las curvas SAF, describiendo su aplicación numérica en la cuenca del valle de la ciudad de San Luis Potosí, México.

Estimación de las curvas SAF

Definición y clasificación de las sequías

Las sequías difieren de otros peligros naturales, como las crecientes, los huracanes y los terremotos, en que sus efectos se acumulan durante meses e incluso años; además, es difícil precisar su inicio y terminación. La definición más general indica que es un periodo sostenido y prolongado de escasez de agua. Como tal deficiencia de agua también está asociada con su origen o naturaleza, se identifican cuatro tipos de sequías: (1) la *meteorológica*, definida como la falta de precipitación sobre una región durante un cierto lapso; (2) la *hidrológica*, relacionada con un periodo con disponibilidad de escurrimiento insuficiente para satisfacer las demandas; (3) la *agrícola*, ligada por lo general a una deficiencia de humedad del suelo y la consecuente pérdida de los cultivos, y (4) la *socio-económica*, asociada con la falla del

sistema de recursos hidráulicos que abastece las demandas, y entonces origina problemas sociales y daños en las actividades económicas.

Etapas del procedimiento

La estimación de las curvas SAF para analizar sequías meteorológicas implica procesar los registros de precipitación mensual con base en las siguientes cinco etapas para su establecimiento: (1) recopilación y selección de registros a utilizar; (2) interpolación espacial de registros; (3) cálculo de los déficits anuales de lluvia; (4) procesamiento probabilístico de los déficits anuales, y (5) construcción de las curvas SAF. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de las etapas citadas, y se detallan los análisis o procedimientos específicos que incluyen.

Recopilación y selección de registros pluviométricos

Esta primera etapa requiere del conocimiento geográfico de la región o cuenca para la cual se estimarán las curvas SAF. Lógicamente, entre más información pluviométrica esté disponible, las curvas SAF serán más confiables; lo mismo ocurre si la zona o área es plana y uniforme en condiciones físicas. Por el contrario, la escasez de registros o la disponibilidad de amplitud reducida conducen a curvas SAF inexactas.

La primera parte de esta etapa implica la recopilación de *toda* la información pluviométrica disponible. En seguida, se toman en cuenta sus periodos de registro y se visualizan los problemas asociados con la deducción de todos los datos faltantes, sean éstos mensuales o anuales. Lo anterior, orientado a definir el mayor lapso de *registro común* en todas las estaciones. Posteriormente, se aborda la selección de los registros que serán utilizados, para lo cual se toma en cuenta su distribución dentro de la región o área, y su representatividad, según las condiciones geográficas de ésta, para buscar disponer de

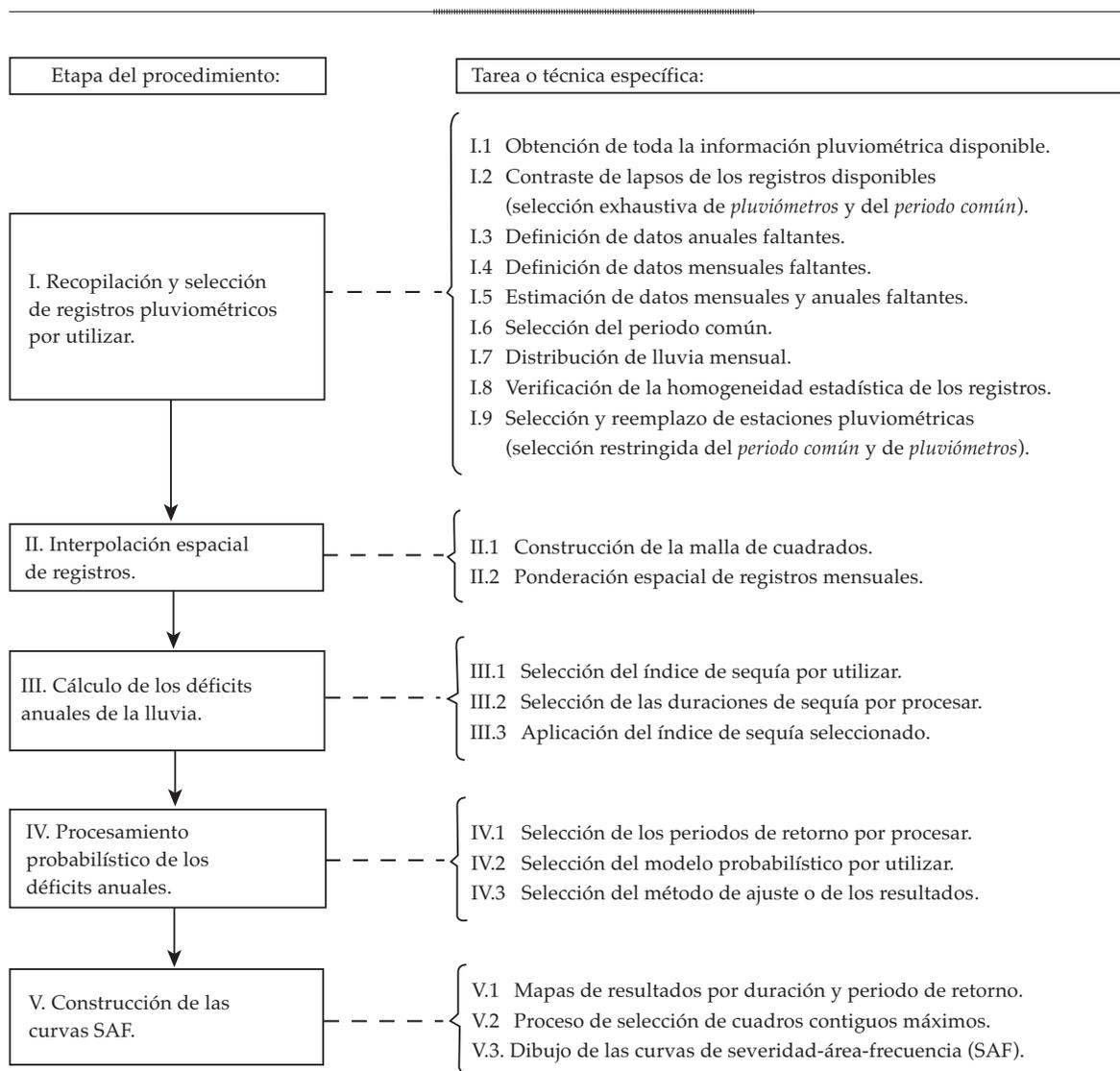


Figura 1. Diagrama de flujo de las etapas y los procedimientos que las integran en el método sugerido para la construcción de las curvas SAF.

una red lo más amplia y uniforme posible. Después se realiza la estimación de todos los datos faltantes de cada registro seleccionado, mensuales y anuales en el periodo común. Por último, se lleva a cabo una verificación de requerimientos estadísticos de los registros seleccionados, con base en sus registros anuales. Por lógica, esta etapa concluye con una nueva selección y remplazo, cuando alguna de las estaciones, previamente seleccionada, no resultó homogénea.

Interpolación espacial de registros

Aunque en la etapa anterior se hubiera logrado establecer una red de estaciones pluviométricas bastante uniforme dentro de la región de estudio, sus áreas de influencia de acuerdo con los polígonos de Thiessen probablemente serían muy pocas para poder tomar en cuenta la distribución espacial de las sequías en la construcción de las curvas SAF. Por ello, Mishra y Singh (2008) recomiendan formar

una cuadrícula sobre la región o cuenca, que la divide en al menos 25 áreas uniformes, y luego crear en el centro de cada cuadro un registro hipotético con base en los reales disponibles. El razonamiento de soporte para la interpolación espacial es el hecho de que los registros de precipitación son similares entre más cercanos están y difieren más conforme están más alejados. Entonces, la técnica básica y elemental de interpolación es la ponderación de cada registro real con el inverso de la distancia al centro de la malla (Mishra y Singh, 2008).

Ahora cada precipitación mensual hipotética del periodo común en el centro de cada cuadrado de la malla es igual a la suma ponderada de la misma precipitación mensual en cada registro real. Se acepta que los pesos o factores de ponderación (α_k) son inversamente proporcionales a las distancias (d_k) entre cada sitio del registro hipotético (Y_j) y cada uno de los m registros reales (X_k), esto es (Campos-Aranda, 2008):

$$Y_{j,i} = \sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot X_{k,j,i} \quad \text{con}$$

$$\sum_{k=1}^m \alpha_k = 1.00 \quad (1)$$

y

$$\alpha_k = \frac{1}{d_k(1/d_1 + 1/d_2 + \dots + 1/d_m)} \quad (2)$$

El índice j es mensual y varía de 1 a 12; en cambio, el índice i es anual y por lo tanto fluctúa de 1 al número de años (n) del periodo común procesado.

Cálculo de los déficits anuales de lluvia

Un *índice de sequía* es una variable que indica el efecto de la escasez de agua y que permite definir diversas características de cada sequía, por ejemplo, duración y severidad. Por supuesto que existen varios índices para la sequía meteorológica que han sido sugeridos y todos ellos emplean la precipitación sola o en

combinación con otros elementos climáticos, como la temperatura. Uno de los enfoques más simples ha sido expuesto por Campos-Aranda (2012) y consiste en obtener la suma de las deficiencias de la precipitación mensual con respecto a su *mediana*, para obtener el déficit anual. La duración de las sequías es tomada en cuenta al definir los periodos más lluviosos por analizar: (1) un mes, (2) los tres meses consecutivos, (3) los seis meses consecutivos y (4) todo el año.

Para el cálculo del déficit anual en cada centro de cuadro de la malla, se tienen que estimar los valores medianos, contra los que se compara la lluvia hipotética que se obtuvo en la interpolación espacial, esto se realiza también con base en las ecuaciones (1) y (2).

Procesamiento probabilístico de los déficits anuales

Al tomar en cuenta que las predicciones asociadas con los déficits anuales obtenidos en cada centro de la cuadrícula, para duraciones de 1, 3, 6 y 12 meses, que son necesarias para construir las curvas SAF, tendrán periodos de retorno relativamente bajos, de 5, 10, 25, 50, 75 y 100 años, que se pueden obtener mediante el ajuste de cualquiera de las distribuciones de probabilidad actualmente recomendadas para procesar valores máximos, como son la General de Valores Extremos, la Log-Pearson tipo III y la Logística Generalizada, pues es probable que ellas conduzcan a predicciones similares.

Integración de las curvas SAF

Para realizar esta etapa se deben elaborar 24 mapas de la región o cuenca, a fin de indicar en cada centro de su cuadrícula una predicción; entonces son cuatro para cada uno de los seis periodos de retorno procesados, siendo cada uno de ellos el correspondiente a una de las duraciones empleadas. Con base en cada mapa se calculan los valores máximos asociados con áreas crecientes, desde el cuadro del valor máximo hasta el promedio de todos

los cuadros. Se sigue un procedimiento que intenta reproducir el avance de las sequías en el mundo real. Se identifica el cuadro con la predicción máxima, después se revisan los cuadros contiguos a sus lados y se selecciona el de valor máximo, se obtiene su promedio y se continúan revisando ahora todos los cuadros adyacentes, para hacer la suma y promedio de tres cuadros. Se sigue así sucesivamente hasta obtener el promedio de todas las predicciones indicadas en el mapa procesado, el cual equivale al 100% de área (Sheffield y Wood, 2011). En la figura 2 se esquematiza por pasos la selección de las magnitudes máximas, y la definición de sus valores contiguos o aledaños.

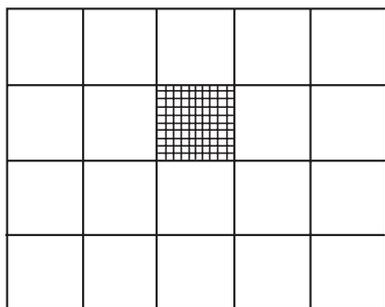
Con los resultados del procesamiento de cada mapa se construye una curva SAF en un gráfico natural, en cuyas abscisas se indican las áreas del 0 al 100%, o bien de 0 al tamaño en km² de la región o cuenca procesada. En primer punto dibujado corresponde al

porcentaje o área en km² que tiene un cuadro de la malla construida; los puntos posteriores son estos valores acumulados para dos, tres y así sucesivamente hasta el número de cuadros de la malla o valores con que se define cada curva SAF. Lógicamente, en las ordenadas se dibujan los valores de las predicciones de los déficits, obtenidos como máximos por áreas contiguas. Se forman cuatro gráficas de curvas SAF, una para cada duración analizada, y cada gráfica tiene seis curvas, una para cada periodo de retorno procesado.

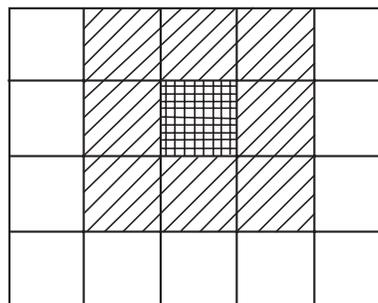
Utilidad de las curvas SAF

Como ya se indicó, las curvas SAF caracterizan a las sequías meteorológicas de una zona o región, y por lo tanto la comparación entre ellas permitirá apreciar sus diferencias, principalmente en intensidad, es decir, en las magnitudes dibujadas en el eje de las ordenadas. Las curvas SAF también permiten

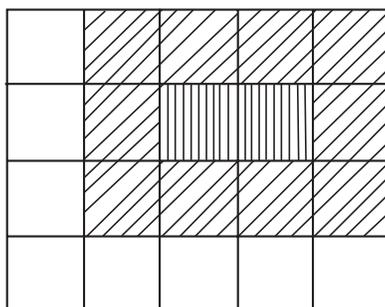
Paso 1) selección de valor máximo.



Paso 2) máximo y valores contiguos.



Paso 3) dos máximos y valores contiguos.



Paso 4) tres máximos y valores contiguos.

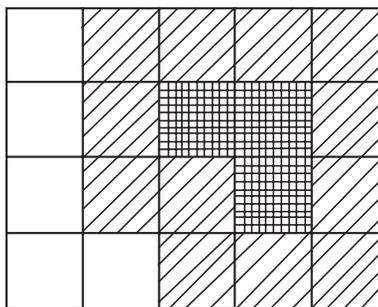


Figura 2. Definición por pasos de valores máximos por áreas contiguas (Tallaksen y Van Lanen, 2004).

disponible en las estaciones pluviométricas del cuadro 1 fue obtenida en las oficinas de la Dirección Estatal San Luis Potosí de la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

En la columna final del cuadro 1 se citan los años que están *faltantes* en cada registro y que por lo tanto se tendrán que estimar mediante regresión con algún registro pluviométrico cercano que los contenga. Aparte existen los años *incompletos*, en los cuales faltan de uno a cinco meses, mismos que serán estimados con base en la moda y la precipitación confiable mensuales, siempre y cuando éstos no pertenezcan en su totalidad al periodo lluvioso de mayo-octubre, pues en tal caso el año fue considerado faltante.

El único registro que no presenta años incompletos en su periodo total disponible es el del observatorio meteorológico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), el cual se puede obtener hasta el año 2000 en Moreno-Castro *et al.* (2004), y de 2001 a 2009 en Campos-Aranda (2012). Las lluvias mensuales del año 2010 son las siguientes: 27.9, 84.7, 0.0, 14.7, 29.9, 31.1, 53.4, 32.6, 0.0, 0.9, 4.0 y 0.0. Por el contrario, uno de los registros más incompletos es el del observatorio meteorológico de San Luis Potosí, ubicado en el Parque Tangamanga II,

antes el aeropuerto, con ocho años faltantes en el periodo 1971-1978. En los cuadros 2 y 3 se exponen los registros de la estación El Peaje, completa, y de El Terrero, la más incompleta. Debido a la cercanía de la estación Zaragoza con Xoconoxtle, la primera será procesada para contraste de las estimaciones en la segunda.

Establecimiento del periodo común de datos

El *periodo común* para el estudio fue definido por el inicio de operación de la estación Xoconoxtle, la cual comenzó su registro en octubre de 1980; por lo anterior, abarcará de 1981 a 2010 con sólo treinta años. La estación El Terrero, que comenzó en 1983, requerirá de la estimación de sus dos años iniciales. Aunque la amplitud del periodo común puede parecer corta, se considera adecuada debido a que el periodo de retorno de cien años será el más grande procesado para definir el término de frecuencia en las curvas SAF. Conviene recordar (Kite, 1977) que es frecuente en los análisis probabilísticos considerar aceptable la extrapolación del registro de tres a cinco veces, para obtener la mayor predicción. Todas las estimaciones que se describen a continuación, relativas a meses y años faltantes, así como los diversos análisis que se realizarán con

Cuadro 1. Características generales y del periodo común 1981-2010 de las estaciones pluviométricas del valle de San Luis Potosí y cercanas.

Nombre	Clave	Coordenadas geográficas			Periodo de registro en años	Años faltantes (núm. de incompletos) entre 1981-2010
		Long.	Latitud	Altitud*		
1. Facultad de Ingeniería	-	101° 01'	22° 08'	1 893	1922-2010	-
2. Los Filtros (DGE)	24069	101° 01'	22° 09'	1 877	1949-2010	-
3. Observ. SLP (SMN)	24111	100° 59'	22° 11'	1 877	1966-2010	-
4. El Peaje	24024	101° 06'	22° 05'	2 100	1963-2010	-
5. Xoconoxtle	24179	100° 42'	23° 05'	2 035	1980-2010	(7)
6. Mexquitic	24042	101° 07'	22° 16'	2 062	1942-2010	1993, 1994 (5)
7. Soledad Diez Gtz.	24081	100° 55'	22° 11'	1 882	1945-2010	1984, 1989, 1990, 1998 (6)
8. El Terrero	24197	100° 53'	22° 24'	1 890	1983-2010	1981, 1982, 1997, 1998 (11)
9. Zaragoza	24106	100° 44'	22° 03'	2 000	1961-2010	1984 (1)
10. Los Pilares	24038	101° 05'	22° 27'	1 775	1963-2008	2009, 2010

* En metros sobre el nivel del mar (msnm).

Cuadro 2. Precipitación mensual (mm) en el periodo común en la estación pluviométrica El Peaje del valle de San Luis Potosí.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
1981	34.9	18.0	2.5	41.6	76.4	114.0	60.0	25.5	63.0	57.4	1.0	10.0	504.3
1982	0.0	1.0	1.9	27.0	65.0	1.0	59.5	30.0	11.5	59.8	18.9	15.8	291.4
1983	24.5	0.0	0.0	0.0	51.4	41.3	61.5	23.3	38.8	13.0	5.5	0.0	259.3
1984	57.0	16.5	0.0	0.0	30.0	63.1	155.5	36.2	101.8	38.0	0.0	9.6	507.7
1985	1.0	0.0	7.5	28.0	75.8	156.5	99.0	76.7	4.2	18.2	7.7	10.7	485.3
1986	0.0	3.0	0.0	90.8	29.8	75.8	89.5	23.0	54.9	7.4	27.0	2.0	403.2
1987	13.2	10.2	0.0	34.0	30.0	62.2	98.7	9.5	62.3	0.0	2.5	0.0	322.6
1988	17.3	0.0	17.1	56.0	29.2	42.3	57.0	122.3	48.7	2.0	0.0	7.5	399.4
1989	2.0	1.5	0.0	1.0	37.0	80.4	3.0	100.5	24.0	0.0	5.5	28.0	282.9
1990	5.5	13.8	7.5	3.0	67.0	20.5	32.1	48.1	72.4	101.8	1.0	0.0	372.7
1991	6.0	6.0	0.0	0.0	53.8	39.5	219.1	19.4	86.2	30.5	15.5	0.0	476.0
1992	119.9	26.0	9.0	15.9	104.4	26.5	37.5	13.3	37.5	56.7	24.7	5.7	477.1
1993	17.4	5.0	0.0	7.9	21.5	123.7	42.4	12.5	134.8	6.0	33.5	0.0	404.7
1994	17.0	0.0	0.0	44.0	38.7	97.0	40.8	26.3	41.3	40.9	2.0	0.0	348.0
1995	7.0	0.0	15.0	0.0	63.4	12.5	24.5	138.8	16.9	8.5	10.7	27.4	324.7
1996	0.5	0.0	0.0	0.0	20.2	46.5	55.2	76.4	100.0	32.5	0.0	0.0	331.3
1997	26.5	18.5	43.6	67.2	58.0	52.5	118.0	15.0	1.2	31.5	7.0	0.0	439.0
1998	0.0	5.0	0.8	0.0	2.8	46.4	12.0	27.5	149.5	95.3	0.0	0.0	339.3
1999	0.0	0.0	5.5	5.7	27.7	22.5	131.9	25.8	95.4	9.4	3.7	7.1	334.7
2000	0.7	0.0	3.5	0.0	35.7	102.9	13.7	38.0	29.1	21.6	7.9	28.8	281.9
2001	1.3	3.0	15.0	21.5	18.7	64.0	40.7	53.0	74.9	13.2	2.0	14.5	321.8
2002	43.0	29.8	0.0	10.1	13.4	90.3	91.3	69.5	113.0	58.2	38.1	0.0	556.7
2003	8.0	0.0	0.0	11.7	5.3	31.8	121.1	29.0	31.5	80.0	0.0	0.0	319.0
2004	42.4	3.0	88.4	6.5	23.3	167.5	130.7	87.0	98.3	46.3	0.0	9.3	702.7
2005	2.3	42.2	11.50	2.8	3.8	46.0	59.4	26.7	59.5	18.7	0.0	0.9	273.8
2006	13.9	0.0	0.4	18.3	54.0	15.0	78.2	134.3	147.1	56.2	26.9	12.1	556.4
2007	12.0	14.5	16.9	18.7	58.8	120.6	80.3	85.6	82.9	6.2	23.7	0.0	520.2
2008	0.0	1.8	0.0	32.6	18.6	27.3	130.7	282.2	80.7	7.2	0.0	0.0	581.1
2009	0.0	0.0	3.4	3.0	45.8	51.2	119.5	38.7	175.7	69.9	6.0	20.6	533.6
2010	32.3	126.3	0.0	12.0	18.7	62.3	205.7	52.0	54.1	0.5	0.0	0.0	563.9
Valor mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	1.0	3.0	9.5	1.2	0.0	0.0	0.0	259.3
Valor máximo	119.9	126.3	88.4	90.8	104.4	167.5	219.1	282.2	175.7	101.8	38.1	28.8	702.7

los registros pluviométricos mensuales completados para llegar a construir las curvas SAF estarán basados exclusivamente en el periodo común 1981-2010.

Selección por ubicación de las estaciones pluviométricas

Como ya se indicó, la ubicación de las ocho estaciones pluviométricas disponibles den-

tro del valle de San Luis Potosí no es ni remotamente ideal. En realidad, la mitad de ellas están localizadas al suroeste del valle y tres de éstas dentro de la zona urbana; además, tales estaciones son las de registro completo en el periodo común: Facultad de Ingeniería, Los Filtros, Observatorio SLP y El Peaje. De tales estaciones, El Peaje, por ubicarse en la zona cerril, será utilizada, así como alguna de las restantes. Por su proximidad con las estaciones

Cuadro 3. Precipitación mensual (mm) en el periodo común en la estación pluviométrica El Terrero del valle de San Luis Potosí.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
1981	(12.2)	(3.1)	(3.1)	(12.8)	(35.6)	(49.4)	(73.0)	(34.7)	(51.0)	(16.8)	(8.3)	(13.1)	(313.1)
1982	(7.9)	(2.0)	(2.0)	(8.3)	(23.1)	(32.1)	(47.4)	(22.6)	(33.2)	(10.9)	(5.4)	(8.5)	(203.4)
1983	(9.8)	(2.5)	(2.5)	(10.3)	(28.8)	(39.8)	(58.8)	(28.0)	(41.1)	(13.6)	(6.8)	(10.2)	(252.2)
1984	(0.0)	(0.0)	(0.0)	0.0	25.6	60.0	83.6	22.0	48.0	5.0	0.0	13.0	257.2
1985	1.0	0.0	1.0	17.0	84.0	86.0	149.8	14.0	16.0	8.0	2.0	10.0	388.8
1986	0.0	1.0	0.0	25.0	25.0	73.9	43.0	8.0	60.0	29.0	27.0	4.0	295.9
1987	8.0	11.0	0.0	15.0	21.0	72.0	72.0	19.0	58.0	0.0	2.0	0.0	278.0
1988	(13.7)	(3.5)	(3.5)	(14.4)	(40.0)	(55.5)	(81.9)	(39.0)	(57.3)	(18.9)	(9.3)	(14.6)	(351.6)
1989	(6.3)	(1.6)	(1.6)	(6.6)	(18.4)	(25.5)	(37.7)	(17.9)	(26.4)	(8.7)	(4.3)	(6.7)	(161.7)
1990	(7.6)	(1.9)	(1.9)	(8.0)	(22.3)	(30.9)	(45.6)	(21.7)	(31.8)	(10.5)	(5.3)	(8.2)	(195.7)
1991	0.0	13.0	(0.0)	0.0	45.0	74.0	124.0	6.0	67.0	28.0	0.0	29.0	386.0
1992	106.0	3.0	10.0	10.0	46.0	27.0	30.0	8.0	11.0	45.0	20.0	4.0	320.0
1993	60.0	0.0	(0.0)	91.5	38.0	83.0	31.0	18.0	134.0	3.0	(0.8)	(0.0)	459.3
1994	16.0	0.0	(0.0)	41.0	19.0	163.0	29.0	35.0	23.0	57.0	2.0	1.0	386.0
1995	2.0	(0.0)	0.0	3.0	48.0	4.0	46.0	216.0	35.0	1.0	11.0	20.0	386.0
1996	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(1.5)	65.0	3.0	34.0	114.0	116.0	21.0	3.0	0.0	357.5
1997	(11.8)	(3.0)	(3.0)	(12.4)	(34.5)	(47.8)	(70.5)	(33.6)	(49.3)	(16.3)	(8.1)	(12.5)	(302.8)
1998	(6.4)	(1.6)	(1.6)	(6.8)	(19.0)	(26.3)	(38.8)	(18.5)	(27.1)	(9.0)	(4.5)	(6.9)	(166.5)
1999	0.0	0.0	5.0	4.0	2.0	2.0	73.0	38.0	72.0	11.0	3.0	2.0	212.0
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	71.0	7.0	10.0	0.0	17.0	6.0	8.0	125.0
2001	0.0	0.0	0.0	22.0	12.0	46.0	13.3	67.0	62.0	2.0	0.0	0.0	224.3
2002	(0.0)	(0.0)	0.0	0.0	14.0	42.0	101.0	(2.2)	(11.3)	73.0	15.0	(0.0)	258.5
2003	8.0	3.0	0.0	4.0	16.0	53.0	61.0	6.0	33.0	37.0	4.0	86.5	311.5
2004	13.0	0.0	26.6	1.0	58.0	104.0	26.0	(2.2)	(11.3)	(2.2)	(0.8)	0.0	245.0
2005	4.0	29.0	6.0	(1.5)	3.0	2.0	60.0	25.0	48.0	0.0	1.0	0.5	180.0
2006	10.0	0.0	8.0	4.5	63.5	8.0	70.0	56.0	95.0	19.0	20.0	14.0	368.0
2007	14.0	16.0	8.0	(1.5)	62.0	(2.0)	95.0	54.0	50.0	15.0	26.0	0.0	343.5
2008	0.0	0.0	0.0	13.0	26.0	28.0	104.0	11.0	64.0	6.0	8.1	3.0	263.1
2009	0.0	1.0	9.0	27.0	68.0	13.0	50.5	18.0	32.0	19.0	38.0	60.6	336.1
2010	3.0	1.0	3.0	19.4	69.4	48.3	102.4	54.1	24.0	0.0	0.0	0.0	324.6
Valor mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	7.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	125.0
Valor máximo	106.0	29.0	26.5	91.5	84.0	163.0	149.8	216.0	134.0	73.0	38.0	86.5	459.3

Nota: entre paréntesis, los valores estimados.

de la zona urbana, Soledad Diez Gutiérrez no fue seleccionada, pero será completada para usarse como estación auxiliar, al estimar los valores faltantes de las estaciones Mexquitic y El Terrero. En resumen, El Peaje, Mexquitic, El Terrero y Xoconoxtle, son seleccionadas debido a su ubicación próxima a la periferia del valle,

además se escogerá una estación de la zona urbana.

Estimación de valores mensuales faltantes

Se insiste en que sólo se procesan, por meses, todos los datos disponibles en el periodo de

1981-2010 para estimar los valores mensuales de la *moda* y de la *precipitación confiable*, definida esta última como la lluvia con probabilidad de excedencia del 75%. Tales estimaciones se realizaron ajustando a cada serie mensual disponible del dato faltante la distribución Gamma Mixta (Campos-Aranda, 2005). Por tratarse de un estudio de sequías, los valores buscados deben ser bastante confiables, así se aceptó la siguiente regla de selección: cuando existe la moda se adopta ésta, siempre y cuando no exceda a la precipitación confiable, de ser el caso, se adopta tal valor. Lo anterior se ilustra en el cuadro 4, con negritas para la estación Mexquitic, que es de las más incompletas.

Distribución mensual de la lluvia

El fin primordial de la estimación de los valores mensuales faltantes, a través de su moda o de la precipitación confiable, es completar los años incompletos y así disponer del mayor número de años para obtener magnitudes confiables del promedio mensual y de sus porcentajes respecto del promedio anual. Estas cantidades se tienen en el cuadro 5. Con base en tales porcentajes, se distribuirá mensualmente cada valor anual estimado por regresión.

Estimación de valores anuales faltantes

Cuando en un registro faltó uno o más años completos, o bien existen años que presentan más de cuatro meses sin datos, y éstos coin-

ciden en el periodo lluvioso, se estimó su valor a través de regresión lineal con la estación pluviométrica más cercana y éste se reparte según los porcentajes definidos en el cuadro 5. En el cuadro 1 se observa que existen cuatro estaciones pluviométricas con años faltantes: Soledad Diez Gutiérrez, Mexquitic, El Terrero y Zaragoza.

El diagrama de dispersión de la lluvia anual entre la estación Soledad D.G. y Observatorio SLP, que es la más cercana, permitió detectar dos datos dispersos: los años 1992 y 1998. Al eliminar tales valores, se obtuvo la recta de regresión con 24 parejas de datos, cuyo coeficiente de correlación lineal fue de 0.805, con un error estándar de la estimación de 54.3 mm (Campos-Aranda, 2010). Los cuatro valores anuales estimados se muestran entre paréntesis en el cuadro 6. Desafortunadamente, los diagramas de dispersión entre Soledad D.G. y las estaciones incompletas Mexquitic y El Terrero no mostraron correspondencia lineal.

La estación El Terrero es la más incompleta, pues le faltan los dos años iniciales del periodo común, así como 1997 y 1998. Las lluvias mensuales de 1983 se tomaron como valores anormales altos, pues su suma fue de 970.7 mm. Por el contrario, los valores mensuales de los años 1988, 1989 y 1990 fueron considerados anómalos bajos, ya que sus sumas anuales fueron de 48.7, 16.0 y 22.8 mm, respectivamente, entonces estos años también están faltantes. En resumen, le faltan ocho años en el periodo común. Para completar la estación El Terrero,

Cuadro 4. Resultados en milímetros de la estimación de la moda y la precipitación confiable en la estación pluviométrica Mexquitic con base en la distribución Gamma Mixta.

Concepto	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Número de datos	26	29	28	29	27	28	28	29	28	30	28	27
Número de valores nulos	11	11	16	13	1	1	0	2	0	2	10	9
Media aritmética	14.3	11.5	6.8	13.7	44.7	72.2	79.1	53.7	71.7	32.9	6.9	8.1
Moda	NE*	NE	4.8	NE	7.9	23.4	9.9	19.4	29.6	1.4	2.8	NE
Mediana muestral	3.4	1.6	0.0	1.2	40.1	80.5	74.8	38.0	64.4	26.6	4.9	2.0
Mediana poblacional	3.3	2.4	0.0	2.4	33.1	56.6	58.2	42.2	58.6	22.8	3.8	3.1
Precipitación confiable	0.0	0.0	0.0	0.0	14.7	27.8	27.0	19.9	32.4	8.6	0.0	0.0

* NE: no existe.

Cuadro 5. Distribución de la precipitación media mensual (mm) en las estaciones pluviométricas del valle de San Luis Potosí.

Estación y valor	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Fac. de Ing.													
Lluvia media	14.1	10.0	3.4	19.9	38.7	64.9	58.5	48.8	70.9	28.1	8.9	7.7	373.8
% del anual	3.8	2.7	0.9	5.3	10.4	17.4	15.7	13.1	19.0	7.5	2.4	2.1	100.3
Los Filtros													
Lluvia media	15.5	9.6	5.1	20.3	41.3	61.1	78.9	49.4	66.2	31.0	8.5	7.4	394.3
% del anual	3.9	2.4	1.3	5.1	10.5	15.5	20.0	12.5	16.8	7.9	2.2	1.9	100.0
Observ. SLP													
Lluvia media	15.4	9.5	5.5	22.2	41.8	63.7	64.6	45.3	62.2	30.9	7.8	6.8	375.7
% del anual	4.1	2.5	1.5	5.9	11.1	17.0	17.2	12.1	16.6	8.2	2.1	1.8	100.1
Soledad D. G.													
Lluvia media	14.9	10.1	3.4	22.3	34.3	56.5	56.0	39.8	55.9	27.2	8.8	7.4	336.7
% del anual	4.4	3.0	1.0	6.6	10.2	16.8	16.6	11.8	16.6	8.1	2.6	2.2	99.9
El Peaje													
Lluvia media	16.9	11.5	8.3	18.6	39.3	63.4	82.3	58.2	69.7	32.9	9.0	7.0	417.2
% del anual	4.1	2.8	2.0	4.5	9.4	15.2	19.7	14.0	16.7	7.9	2.2	1.7	100.2
Mexquitic													
Lluvia media	13.3	11.9	6.8	14.0	43.3	72.2	79.1	54.4	70.3	33.1	6.9	7.8	413.0
% del anual	3.2	2.9	1.6	3.4	10.5	17.5	19.2	13.2	17.0	8.0	1.7	1.9	100.1
El Terrero													
Lluvia media	11.5	3.0	3.0	12.1	33.9	47.1	69.5	33.1	48.7	16.2	8.0	12.6	298.6
% del anual	3.9	1.0	1.0	4.1	11.4	15.8	23.3	11.1	16.3	5.4	2.7	4.2	100.2
Xoconoxtle													
Lluvia media	10.8	11.9	5.1	22.7	37.9	49.0	65.1	59.2	73.7	28.3	8.3	6.0	377.9
% del anual	2.9	3.1	1.3	6.0	10.0	13.0	17.2	15.7	19.5	7.5	2.2	1.6	100.0
V. de Zaragoza													
Lluvia media	8.7	7.8	5.2	20.6	35.8	39.9	48.7	56.9	52.0	21.8	6.2	4.7	308.3
% del anual	2.8	2.5	1.7	6.7	11.6	12.9	15.8	18.5	16.9	7.1	2.0	1.5	100.0
% anual prom.	3.79	2.55	1.33	5.11	10.44	16.03	18.61	12.94	17.31	7.56	2.26	1.92	-
S del % anual	0.50	0.67	0.37	1.07	0.62	1.50	2.45	1.44	1.22	0.91	0.31	1.09	-
Cv del % anual	0.13	0.26	0.28	0.21	0.06	0.09	0.13	0.11	0.07	0.12	0.14	0.57	-

se revisó si su lluvia anual mostraba correlación con la de la estación Mexquitic, pero no fue así. Por lo anterior, se buscaron en el norte del valle de San Luis Potosí estaciones pluviométricas cercanas, se encontraron dos: Villa Hidalgo y Los Pilares; la primera es la más cercana, pero fue suspendida en 1986, y la segunda se ubica cerca del poblado de Ahualulco. El registro disponible de lluvia anual en Los Pilares se tiene en la última columna del cuadro 6.

El diagrama de dispersión entre la lluvia anual de las estaciones Los Pilares y El Terrero se construyó con veinte parejas de datos, ya que en El Terrero faltan ocho años y en Los Pilares no se tienen datos en los dos últimos años del periodo común. En tal diagrama se detectaron cinco años que fueron considerados valores dispersos (años 1993, 1995, 1996, 2004 y 2006); la regresión obtenida con 15 parejas de datos tiene un coeficiente de correlación

Cuadro 6. Precipitaciones anuales (mm) en el periodo común en las estaciones pluviométricas del valle de San Luis Potosí y cercanas.

Año	Fac. de Ingeniería	Los Filtros	Observ. SLP	Soledad D. G.	El Peaje	Mexquitic	El Terrero	Xoconoxtle	Villa de Zaragoza	Los Pilares
1981	446.7	500.7	444.3	395.9	504.3	492.9	(313.1)	286.3	355.1	474.6
1982	321.1	326.7	293.3	195.6	291.4	305.7	(203.4)	197.9	281.3	298.2
1983	269.3	280.4	317.1	231.0	259.3	285.1	(252.2)	212.9	303.1	376.8
1984	353.9	361.6	344.6	(307.6)	507.7	564.9	257.2	426.7	(397.4)	377.2
1985	477.1	489.1	526.2	347.9	485.3	478.4	388.8	487.7	405.5	437.6
1986	446.4	456.7	446.2	445.6	403.2	439.7	295.9	256.9	345.0	421.0
1987	354.6	364.8	348.9	271.3	322.6	427.0	278.0	143.7	228.5	393.5
1988	383.6	455.0	438.7	403.8	399.4	576.3	(351.6)	385.7	444.0	536.6
1989	241.5	239.5	219.0	(216.7)	282.9	270.5	(161.7)	292.9	127.0	231.3
1990	355.7	395.5	341.1	(304.8)	372.7	420.4	(195.7)	410.0	178.0	285.9
1991	571.7	528.1	518.2	485.6	476.0	641.2	386.0	709.0	232.9	492.5
1992	495.0	469.6	414.2	532.5	477.1	480.8	320.0	403.0	181.0	525.2
1993	351.6	296.1	318.2	263.9	404.7	(394.6)	459.3	540.0	308.0	382.9
1994	380.0	332.8	484.1	368.7	348.0	(471.1)	386.0	476.0	336.5	472.9
1995	292.4	285.7	306.5	278.2	324.7	395.4	386.0	314.0	260.0	337.3
1996	299.1	280.4	295.7	268.0	331.3	304.5	357.5	425.0	350.0	281.9
1997	462.6	432.6	372.9	151.9	439.0	270.5	(302.8)	466.4	441.5	458.1
1998	364.3	363.7	344.9	(307.5)	339.3	160.3	(166.5)	407.0	105.7	238.9
1999	409.8	399.8	306.0	247.3	334.7	163.0	212.0	373.0	184.5	349.9
2000	155.2	169.6	206.3	276.3	281.9	300.0	125.0	276.0	117.0	219.8
2001	267.4	273.9	312.2	362.8	321.8	499.9	224.3	459.0	145.5	420.9
2002	289.9	466.8	475.8	450.8	556.7	642.2	258.5	418.1	219.5	525.2
2003	470.9	425.7	322.5	304.1	319.0	224.7	311.5	332.2	429.0	367.1
2004	480.9	550.8	553.9	537.9	702.7	474.8	245.0	421.0	407.5	607.2
2005	292.8	295.1	213.0	264.3	273.8	358.4	180.0	321.0	355.5	350.9
2006	510.8	509.8	405.7	341.4	556.4	383.0	368.0	436.0	433.1	342.4
2007	431.3	516.9	505.7	399.5	520.2	457.0	343.5	300.5	589.5	578.3
2008	260.3	373.5	323.5	241.3	581.1	590.5	263.1	388.0	376.0	437.5
2009	497.8	494.5	442.7	288.1	533.6	448.4	336.1	288.4	372.0	-
2010	279.2	492.7	428.3	400.8	563.9	508.4	324.6	484.0	427.5	-
Mín	155.2	169.6	206.3	151.9	259.3	160.3	125.0	143.7	105.7	219.8
Máx	571.7	550.8	553.9	537.9	702.7	642.2	459.3	709.0	589.5	607.2
Media	373.8	394.3	375.7	329.7	417.2	414.3	288.4	377.9	311.2	400.8
Mediana	360.0	397.6	346.9	306.1	401.3	433.3	299.3	395.5	340.7	388.2
S	98.680	99.934	94.575	96.809	114.836	129.778	81.565	113.854	119.199	103.653
Cv	0.264	0.253	0.252	0.294	0.275	0.313	0.283	0.301	0.383	0.259
Cs	-0.026	-0.318	0.092	0.525	0.531	-0.200	-0.107	0.419	-0.025	0.090
Ck	2.625	2.410	2.499	3.005	2.715	2.720	2.632	4.539	2.764	2.664
r ₁	0.024	0.116	-0.172	0.001	0.012	0.216	0.346	0.164	0.403	-0.109

Nota: entre paréntesis, los valores estimados por regresión lineal.

lineal de 0.713, con un error estándar de la estimación de 56.4 mm. Los valores anuales estimados en la estación El Terrero se muestran entre paréntesis en el cuadro 6; su distribución mensual se realizó con base en los promedios establecidos en el cuadro 5 y se presentan entre paréntesis en el cuadro 3.

Para completar a la estación Mexquitic, también se empleó el registro de lluvia anual de Los Pilares, cuyo diagrama de dispersión con 26 parejas de datos condujo a una regresión lineal, cuyo coeficiente de correlación lineal resultó de 0.659, con un error estándar de la estimación de 105.7 mm. Este valor de correlación pudo ser mejorado, eliminando datos dispersos de arriba y abajo de la recta de regresión, pero ello se consideró innecesario. Los valores anuales estimados en la estación Mexquitic se muestran entre paréntesis en el cuadro 6. Nuevamente, su repartición mensual se llevó a cabo con base en sus porcentajes, mostrados en el cuadro 5.

Por último, se dedujo el año faltante en la estación Zaragoza con base en el registro anual de Xoconoxtle. Su diagrama de dispersión mostró dos años dispersos: 1991 y 2007; además, nueve puntos se apartan bastante de la recta de 45°, indicando valores de lluvia anual en Zaragoza muy reducidos en dos periodos: 1989-1993 y 1998-2002. Tales datos fueron eliminados. Con 18 parejas de datos, la regresión mostró un coeficiente de correlación lineal de 0.730 y un error estándar de la estimación de 45.3 mm. El valor estimado se muestra entre paréntesis en el cuadro 6.

Verificación de requerimientos estadísticos

Para que los resultados de los análisis probabilísticos sean válidos teóricamente, la serie de datos o muestra utilizada debe cumplir con ciertos requisitos estadísticos: aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad (Campos-Aranda, 2010). Con base en los registros de lluvia anual (cuadro 6), se probó homogeneidad y estacionalidad con dos pruebas básicas: el Test de Helmert

y el de las Secuencias; además, se aplicaron pruebas específicas de persistencia, tendencia, cambios en la media y en la varianza (pruebas de Anderson, Sneyers, von Neumann, Kendall, Cramer y Bartlett); todas ellas se aplicaron con un nivel de confianza del 95%. En el cuadro 6, S , Cv , Cs , Ck y r_1 son, respectivamente, la desviación estándar y los coeficientes de variación, asimetría, curtosis y de correlación serial de orden 1. Se encontraron no homogéneos los registros de la Facultad de Ingeniería y de Soledad Diez Gtz., el primero según el Test de Helmert y el segundo de acuerdo con la prueba de las Secuencias, pero ambos por exceso de oscilación. En la estación El Terrero se encontró persistencia ($r_1 = 0.346$) según varias pruebas. Por último, la estación Zaragoza resultó no homogénea de acuerdo con las pruebas básicas; además, presentó persistencia ($r_1 = 0.403$), según diversos test.

Selección por conveniencia estadística de las estaciones pluviométricas

Habiendo quedado por seleccionar una estación de las ubicadas en la zona urbana, la que se escoge es Los Filtros, pues tal registro resultó homogéneo, al igual que el del Observatorio SLP; sin embargo, el primero es considerado más confiable, ya que ha tenido menos cambio de personal, de ubicación y de condiciones físicas circundantes.

Meses de análisis de las duraciones de sequía

Otra utilidad del cuadro 5 es permitir definir los meses correspondientes a los periodos de sequía (1, 3, 6 y 12 meses), que serán analizados de la manera siguiente. Primero se obtienen los promedios mensuales de los porcentajes de lluvia, en este caso sólo se promediaron los valores correspondientes a las ocho estaciones ubicadas dentro del valle, pues se excluyó Zaragoza debido a que resultó no homogénea. Tales promedios se muestran en negritas. Se observa que el mes con más lluvia es julio; los tres meses seguidos con mayor lluvia son

julio, agosto y septiembre, y los seis meses consecutivos con más cantidad de lluvia serán de mayo a octubre.

Obtención de los valores medianos mensuales

Con base en los registros completos, se procesan en cada una de las cinco estaciones pluviométricas que serán utilizadas sus registros mensuales en el periodo común, para

obtener los valores medianos tanto muestrales como poblacionales, así como otros estadísticos centrales (moda y precipitación confiable). Los valores citados se obtienen ajustando de nueva cuenta la distribución Gamma Mixta (Campos-Aranda, 2005) cada mes. Los resultados se han concentrado en el cuadro 7, mostrando con negritas las magnitudes que será utilizadas posteriormente, para obtener los déficits de lluvia.

Cuadro 7. Valores asociados con la tendencia central (mm) en el registro mensual del periodo común 1981-2010 de las estaciones pluviométricas del Valle de San Luis Potosí que serán procesadas.

Estación y estadística	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Los Filtros												
Núm. de datos nulos	7	8	15	8	1	0	0	0	0	2	6	13
Mediana muestral	6.5	2.5	0.5	10.8	35.7	49.9	70.9	35.5	52.1	25.9	3.8	2.6
Mediana poblacional	7.8	3.8	0.0	10.9	35.7	47.8	64.1	39.2	52.3	22.6	5.2	3.2
Moda	NE*	NE	NE	NE	23.9	18.2	31.4	16.5	21.0	5.4	0.1	4.5
Precipitación confiable	0.3	0.0	0.0	0.0	21.0	24.7	35.2	20.7	27.3	9.4	0.8	0.0
El Peaje												
Núm. de datos nulos	6	11	13	7	0	0	0	0	0	2	9	14
Mediana muestral	7.5	3.0	1.4	10.9	32.8	51.9	69.9	37.1	62.7	26.1	4.6	1.5
Mediana poblacional	8.4	3.3	1.2	11.6	33.1	52.4	68.7	47.2	56.3	23.5	5.0	2.7
Moda	NE	NE	NE	2.7	19.8	28.4	39.2	22.7	26.8	4.0	1.4	5.9
Precipitación confiable	0.7	0.0	0.0	1.1	19.5	29.7	39.6	25.7	30.6	9.4	0.0	0.0
Mexquitic												
Núm. de datos nulos	13	10	16	13	1	1	0	2	0	1	10	10
Mediana muestral	3.4	2.8	0.0	4.0	41.6	80.5	77.2	49.3	64.5	28.9	5.0	2.6
Mediana poblacional	3.2	3.9	0.0	3.6	32.6	57.7	59.5	43.5	58.0	23.7	4.3	3.2
Moda	NE	NE	4.9	1.0	8.8	26.6	14.1	21.3	30.4	2.8	3.3	NE
Precipitación confiable	0.0	0.0	0.0	0.0	14.9	29.4	28.5	21.0	32.5	10.0	0.0	0.0
El Terrero												
Núm. de datos nulos	10	13	13	4	0	0	0	0	1	3	4	8
Mediana muestral	6.4	1.0	1.6	8.1	27.4	44.0	59.4	21.9	44.6	12.3	4.9	6.8
Mediana poblacional	4.9	0.8	1.3	8.5	29.0	33.8	55.6	25.2	41.3	12.6	5.6	5.8
Moda	0.1	0.1	1.9	0.9	16.9	6.2	42.1	5.0	31.0	4.7	1.2	NE
Precipitación confiable	0.0	0.0	0.0	2.5	16.9	15.8	36.8	11.8	26.0	5.1	1.8	0.0
Xoconoxtle												
Núm. de datos nulos	9	12	12	6	1	0	0	0	1	5	7	16
Mediana muestral	2.0	1.1	1.0	10.7	34.5	41.5	58.5	43.0	64.0	23.5	4.5	0.0
Mediana poblacional	4.0	1.5	1.4	10.7	30.1	35.3	53.0	40.8	60.7	21.0	4.9	0.0
Moda	NE	NE	NE	NE	13.5	3.4	26.5	NE	33.5	10.2	0.5	1.8
Precipitación confiable	0.0	0.0	0.0	0.7	15.2	15.8	29.2	17.0	32.8	6.9	0.4	0.0

* NE: no existe.

Interpolación espacial de registros

Más del 90% del área del valle de San Luis Potosí queda comprendida en la carta Hidrológica de Aguas Superficiales F14-4, denominada San Luis Potosí. La información de esta carta se utilizó para trazar el parteaguas de tal cuenca cerrada en la carta topográfica (INEGI, 1996) de igual clave, ambas impresas y con escala de 1:250 000. El área del valle asciende a los 1 858 km². En la figura 3 se observa que la forma del valle se puede aproximar a la de un rectángulo, cuyos lados se dividieron en cinco tramos, para formar una malla de 25 rectángulos, que son casi cuadrados y por ello, en adelante así se llamarán. Cada rectángulo tiene una altura aproximada de 8.5 km y una base de 9.25 km, por lo cual su área es de 78.625 km². Con tales dimensiones, el valle de San Luis Potosí quedó representado por 23 cuadros (97.3% del área), como se muestra en la figura 3.

En seguida se localizó el centro de gravedad de cada rectángulo, por el punto de cruce de sus bisectrices. Después se midieron manualmente en la carta topográfica F14-4 impresa las distancias (d_k) en milímetros, entre cada centro de un cuadrado y cada una de las cinco estaciones pluviométricas que serán

utilizadas. Los resultados se han concentrado en el cuadro 8. Con base en las distancias d_k se calculan los cinco factores de ponderación para cada cuadrado (α_k) y con ellos se ponderan los registros mensuales, para estimar la serie hipotética. Lo mismo se realiza con los valores medianos del cuadro 7, a fin de estimar las magnitudes mensuales hipotéticas de cada cuadro, cuyos valores anuales se indican en la última columna del cuadro 8.

Cálculo de los déficits anuales de lluvia

Estimadas en cada cuadro, la serie hipotética de lluvia mensual en el periodo común y los valores ponderados de las medianas mensuales, se calcularon los treinta déficits anuales de la lluvia para duraciones de 12, 6, 3 y 1 meses. Tales magnitudes son la suma de sólo los valores negativos obtenidos en cada año del periodo común, en todo el año, en el lapso de mayo a octubre, durante julio, agosto y septiembre, y en julio. Por limitaciones de espacio, en adelante sólo se expondrán los resultados para las duraciones de sequía de 12 y 6 meses. Calculados de la manera descrita, los déficits son negativos, pero se indican y procesan probabilísticamente sin el signo menos. Mayores detalles sobre este

Cuadro 8. Distancias (mm) entre cada centro de gravedad del cuadrado de la malla y la estación pluviométrica indicada. PMA es la precipitación media anual obtenida en el periodo común y MED la mediana anual estimada por ponderación.

Núm. del cuadro	Estación número:					PMA (mm)	MED (mm)	Núm. del cuadro	Estación número:					PMA (mm)	MED (mm)
	1	2	3	4	5				1	2	3	4	5		
1	97	130	62	49	170	365.2	269.5	13	115	160	137	69	85	364.7	267.9
2	117	156	97	13	157	321.6	243.8	14	37	10	78	158	157	405.9	302.2
3	144	186	133	25	152	333.0	250.4	15	13	46	79	131	123	392.8	290.3
4	65	66	19	127	191	399.3	289.0	16	41	83	95	110	91	384.5	282.4
5	55	80	21	91	163	394.0	285.9	17	77	120	120	99	64	376.8	275.1
6	67	106	57	58	140	373.5	274.8	18	113	157	151	101	51	373.1	271.0
7	94	137	93	33	125	350.2	260.6	19	58	38	112	181	150	395.6	292.3
8	126	170	131	39	118	348.1	259.0	20	46	59	112	158	113	390.3	287.3
9	41	33	46	139	172	397.3	292.4	21	61	91	124	141	77	384.4	281.3
10	21	56	47	108	141	391.7	288.2	22	89	125	144	133	42	379.3	274.6
11	45	89	71	81	113	381.0	280.1	23	122	161	170	135	16	377.1	268.2
12	79	124	112	66	93	368.8	271.5	Prom.	-	-	-	-	-	376.0	276.4

procedimiento se pueden obtener en Campos-Aranda (2012).

Procesamiento probabilístico de los déficits anuales

Cada una de las cuatro series de treinta valores del déficit anual, obtenidas en cada uno de los 23 cuadrados de la malla (ver figura 3), fueron procesadas probabilísticamente, ajustando la distribución General de Valores Extremos (GVE), a través de los métodos de sextiles y de momentos L (Campos-Aranda, 2010). Se emplearon sólo estos dos métodos de ajuste,

pues en algunas de las series citadas ocurrieron ceros. En el cuadro 9 se han concentrado las predicciones obtenidas para los déficits anuales de duración de 12 meses, en los seis periodos de retorno que fueron establecidos para las curvas SAF.

En cambio, en el cuadro 10 se muestran las predicciones de los déficits anuales de duración de seis meses, sólo en los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años. Las predicciones indicadas en los cuadros 9 y 10 proceden del método de estimación de parámetros de la GVE, que condujo al menor error estándar de ajuste (Kite, 1977), por lo general, el de momentos L .

Cuadro 9. Predicciones (mm) de los déficits anuales (duración = 12 meses) estimados en cada centro de gravedad de un cuadro de la malla (Local) y sus valores máximos por áreas contiguas (VMAC), en el valle de San Luis Potosí.

Núm. del cuadro	EEA* (mm)	Periodo de retorno en años											
		5		10		25		50		75		100	
		Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC
1	5.2	70.8	92.3	91.6	113.0	120.1	143.4	142.9	169.1	156.8	184.8	167.1	196.3
2	8.1	65.7	90.2	82.6	112.2	103.8	141.1	119.3	167.1	128.3	183.0	134.6	194.8
3	7.2	64.3	88.3	82.2	110.5	106.4	140.1	125.6	164.9	137.3	180.2	145.8	191.4
4	5.9	89.8	88.7	113.0	111.1	141.3	139.4	161.7	164.1	173.2	178.4	181.3	189.1
5	5.7	85.5	88.0	108.5	110.6	137.1	139.7	158.1	162.3	170.2	177.0	178.7	187.6
6	5.1	73.4	87.5	94.8	109.9	124.2	139.3	148.0	161.9	162.5	175.9	173.2	186.3
7	6.1	65.9	86.8	85.0	109.3	111.9	138.5	134.1	161.0	147.9	174.9	158.1	185.3
8	6.1	65.0	86.1	83.5	108.5	109.5	137.8	130.8	160.3	144.0	174.1	153.8	184.3
9	5.2	84.6	85.2	107.1	107.5	137.1	136.9	160.5	159.6	174.5	173.2	184.6	183.7
10	6.3	83.1	84.4	106.4	106.6	138.8	136.1	165.0	159.0	181.2	172.7	193.2	182.7
11	5.4	76.4	83.8	98.2	105.8	128.5	135.2	153.0	158.1	168.2	171.8	179.3	181.8
12	5.4	71.0	84.0	90.8	105.7	118.1	134.3	140.2	157.3	153.8	171.1	163.7	181.1
13	5.2	69.2	83.4	88.2	105.1	114.4	133.3	135.5	156.1	148.4	170.0	157.9	180.0
14	5.8	92.3	82.7	113.0	104.4	138.1	133.0	156.1	155.2	166.3	169.0	173.4	179.0
15	6.7	88.0	82.2	111.4	103.7	143.4	132.2	169.1	154.2	184.8	167.9	196.3	177.9
16	5.7	78.2	81.7	99.8	103.1	129.8	131.4	154.0	153.6	169.0	166.9	180.0	176.7
17	4.8	74.1	81.0	94.1	102.4	121.2	130.7	142.7	152.8	155.8	166.2	165.3	175.8
18	4.8	74.4	80.5	93.1	101.7	117.5	129.9	136.1	151.9	147.2	165.2	155.1	174.8
19	6.1	84.5	79.9	105.9	101.0	133.9	129.1	155.5	151.0	168.3	164.3	177.5	174.0
20	6.2	80.7	79.2	102.6	100.2	132.6	128.3	156.7	150.2	171.5	163.4	182.4	173.0
21	5.3	77.4	78.5	98.3	99.4	126.6	127.4	149.3	149.3	163.1	162.5	173.2	172.1
22	5.1	78.2	77.9	97.3	98.7	121.7	126.4	140.2	148.3	151.0	161.4	158.7	170.9
23	6.5	86.0	77.3	105.3	97.9	128.7	125.4	145.3	146.9	154.7	159.9	161.2	169.3

* Error estándar de ajuste.

Cuadro 10. Predicciones (mm) de los déficits de seis meses de duración estimados en cada centro de gravedad de un cuadro de la malla (Local) y sus valores máximos por áreas contiguas (VMAC), en el valle de San Luis Potosí.

Núm. del cuadro	EEA* (mm)	Periodo de retorno en años							
		5		10		25		50	
		Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC
1	5.0	62.5	78.9	81.8	100.7	107.9	128.6	128.7	153.3
2	6.6	56.2	77.2	72.3	98.6	93.6	125.9	109.9	151.5
3	6.2	54.8	76.0	71.8	97.3	95.5	125.4	114.8	149.1
4	5.7	78.4	76.6	100.7	97.7	128.6	126.1	149.1	149.1
5	6.5	75.5	76.4	96.5	97.6	123.2	125.6	143.1	147.9
6	5.0	64.8	75.8	84.6	97.0	111.6	125.1	133.1	147.1
7	5.0	57.2	75.2	75.3	96.5	101.0	124.4	122.3	146.3
8	5.1	56.4	74.6	74.0	95.8	99.1	123.8	119.9	145.7
9	5.6	73.6	73.8	94.6	94.9	122.5	123.1	144.2	145.1
10	6.3	71.8	73.1	93.7	94.1	124.4	122.3	149.7	144.5
11	5.4	66.5	72.6	87.1	93.5	115.7	121.6	139.1	143.9
12	4.9	62.0	73.2	80.9	92.3	107.1	120.9	128.4	143.0
13	4.9	60.5	72.6	78.8	93.4	104.4	121.1	125.4	142.2
14	5.9	78.9	72.1	98.9	92.7	123.7	120.4	141.8	142.2
15	7.2	75.4	71.6	97.5	92.2	128.2	119.7	153.3	141.5
16	5.9	67.6	71.2	88.2	91.6	117.2	119.1	141.1	140.7
17	5.1	64.7	70.7	83.9	91.0	110.4	118.4	131.8	140.0
18	4.8	64.9	70.2	83.5	90.5	108.8	117.8	129.0	139.4
19	6.1	73.1	69.7	93.4	89.9	120.3	117.1	141.1	138.6
20	6.3	69.9	69.1	90.7	89.1	119.5	116.3	142.9	137.8
21	5.8	67.1	68.4	87.1	88.4	114.7	115.4	137.2	137.0
22	5.2	67.8	67.9	86.8	87.7	112.4	114.5	132.6	136.0
23	6.8	78.8	67.3	98.6	87.0	123.7	113.6	142.5	134.8

* Error estándar de ajuste.

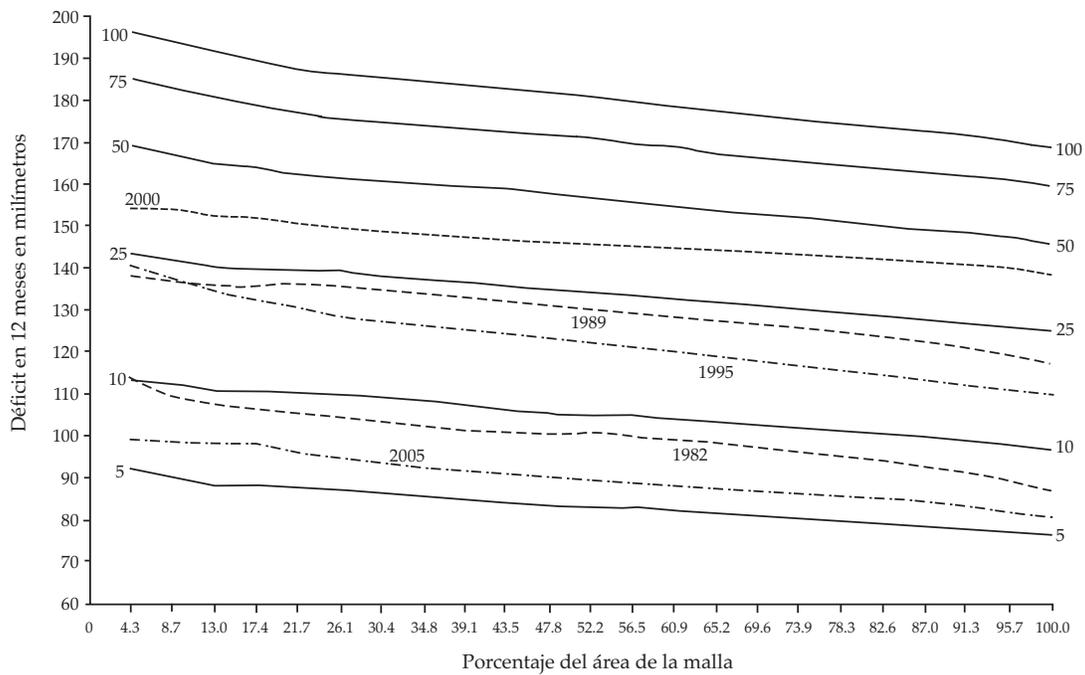


Figura 4. Curvas severidad-área-frecuencia de duración de 12 meses del valle de San Luis Potosí.

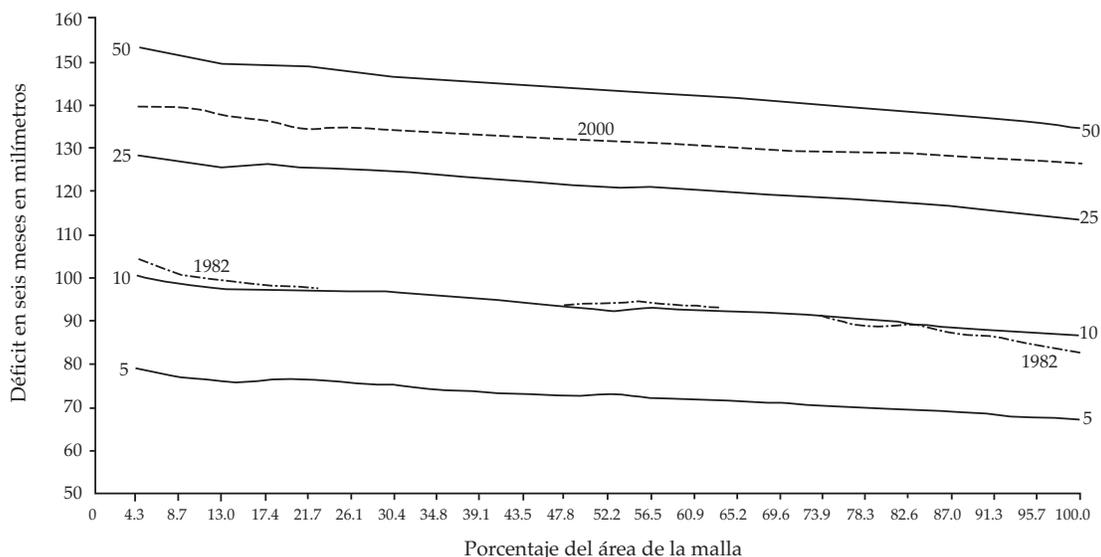


Figura 5. Curvas severidad-área-frecuencia de duración de seis meses del valle de San Luis Potosí.

Integración de las curvas SAF

Las predicciones de cada uno de los periodos de retorno procesados (cuadro 9) se vaciaron en su cuadro respectivo y se procedió a obtener en tales mapas, uno para cada intervalo de recurrencia, los valores máximos por áreas contiguas, los cuales también se han concentrado en el cuadro 9 para la sequía con duración de 12 meses. Con tales valores se construyen las curvas SAF, las cuales se muestran en la figura 4.

Siguiendo un proceso idéntico, se formaron los mapas de predicciones, según datos del cuadro 10, para obtener los valores máximos por áreas contiguas, para la sequía de duración de seis meses; con estas magnitudes se elaboraron las curvas SAF respectivas, mismas que se presentan en la figura 5. Mayores detalles de tal procedimiento se pueden consultar en Mishra y Singh, 2008.

Análisis de las sequías históricas

Durante las etapas de estimación de los déficits anuales y su análisis probabilístico, se detectó que los años de 1982, 1989, 1995, 2000 y 2005,

presentaban los déficits más grandes y por ello son años de sequía. Para estos cinco años se estimaron por ponderación en cada cuadro de la malla sus registros hipotéticos mensuales, así como sus valores medianos mensuales. Formados tales registros, se obtuvieron, en cada cuadro de la malla, los déficits anuales de duración de 12, 6, 3 y 1 meses. Por ejemplo, en el cuadro 11 se exponen los relativos a la duración de 12 meses en los cinco años de sequía definidos previamente. También en este cuadro se muestran los déficits anuales de duración de seis meses, pero sólo en los años de 1982 y 2000.

De nuevo se construyen mapas de cada año de sequía, con los valores de los déficits anuales por cuadro y se obtienen los valores máximos por áreas contiguas, los cuales se dibujan en las curvas SAF de la duración correspondiente, para observar la frecuencia o periodo de retorno que le corresponde a tal sequía, así como su evolución espacial dentro del valle de San Luis Potosí. Las sequías del cuadro 11 se tienen dibujadas con línea punteada en las figuras 4 y 5.

En la figura 4 se observa que todos los años de sequía siguen de manera bastante

Cuadro 11. Déficits (mm) calculados en cada centro de gravedad de un cuadro de la malla (Local) y sus valores máximos por áreas contiguas (MAC), en las siete sequías indicadas del valle de San Luis Potosí.

Núm. del cuadro	Sequías analizadas de duración de 12 meses										Sequías de duración de seis meses			
	1982		1989		1995		2000		2005		1982		2000	
	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC	Local	VMAC
1	75.0	113.6	109.8	138.9	93.8	140.5	144.9	154.2	88.0	99.6	71.7	104.6	131.6	139.8
2	43.1	109.3	74.2	137.1	80.3	137.8	142.7	154.0	83.9	99.0	43.1	101.0	128.5	139.7
3	52.0	107.5	83.2	136.3	86.5	134.8	141.0	152.7	82.0	98.0	51.6	99.4	127.7	137.7
4	101.1	106.5	138.5	135.9	98.0	132.5	154.2	152.3	99.6	98.3	95.2	98.6	139.8	136.5
5	95.6	105.4	134.6	136.4	97.1	130.4	153.7	150.9	98.3	96.4	90.1	97.9	139.6	135.5
6	81.2	104.6	116.8	136.0	100.3	128.7	145.1	149.9	88.1	95.0	76.9	97.1	131.6	134.9
7	64.3	103.9	97.2	135.3	94.0	127.4	141.4	149.1	82.9	94.0	62.2	96.5	128.4	134.2
8	64.5	102.9	95.3	134.5	94.6	126.5	138.8	148.3	79.6	93.1	62.6	95.7	126.7	133.5
9	103.4	101.9	133.8	133.5	119.6	125.4	141.7	147.5	88.9	92.2	96.2	94.9	125.1	132.9
10	100.6	101.1	135.2	132.6	121.8	124.8	150.2	147.0	96.2	91.4	93.8	94.2	133.6	132.4
11	89.9	100.8	123.1	131.8	112.6	123.8	144.2	146.4	86.8	90.7	84.4	93.9	130.1	132.0
12	79.3	101.5	112.3	130.8	107.2	122.8	138.2	146.0	78.9	90.0	75.1	94.7	126.3	131.5
13	79.6	100.7	108.6	129.8	104.6	122.0	134.9	145.5	74.4	89.4	75.9	94.1	124.6	131.1
14	113.6	99.9	134.9	129.0	140.5	120.9	126.5	145.0	79.3	88.9	104.6	93.4	106.8	130.7
15	104.9	99.2	138.9	128.2	135.1	119.8	151.1	144.5	99.0	88.2	97.3	92.7	132.9	130.3
16	94.3	98.0	125.8	127.3	120.2	118.5	141.7	144.0	84.6	87.7	88.2	91.7	127.8	129.9
17	88.7	96.9	118.6	126.5	113.5	117.4	133.6	143.5	72.6	87.2	83.5	90.8	123.7	129.5
18	91.7	96.0	115.1	125.5	111.8	116.3	127.5	143.0	64.2	86.6	86.8	89.9	120.6	129.2
19	104.0	94.9	130.9	124.6	128.8	115.1	134.8	142.5	82.0	86.0	96.4	89.0	118.2	128.8
20	99.7	93.4	129.0	123.3	125.6	114.1	139.2	141.7	84.1	85.3	92.8	87.7	124.1	128.3
21	94.0	92.0	124.6	121.9	120.1	113.1	135.8	141.0	76.9	84.3	87.8	86.4	123.9	127.8
22	97.1	90.2	120.0	120.2	117.0	111.9	125.8	140.3	62.0	83.3	91.4	84.8	119.4	127.1
23	109.1	88.1	117.6	118.2	119.3	110.5	114.2	139.2	44.3	81.6	103.3	83.1	111.9	126.2

aproximada el comportamiento obtenido en las curvas SAF, lo cual significa que en el valle de San Luis Potosí, las sequías presentan el mismo patrón de evolución espacial. De los cinco años con sequías históricas, la del 2005 fue la más leve, cuyo periodo de retorno es del orden de seis años; en cambio, la sequía del año 2000 fue la más severa, con un intervalo de recurrencia del orden de los cuarenta años. Por otro lado, al estudiar la primera y última sequías (1982 y 2000) del periodo común analizado, en las curvas SAF de duración de seis meses de la figura 5, también se observa que siguen el comportamiento general de las curvas y que ahora la sequía de 1982 tiene un periodo de retorno de diez años.

Modificaciones al procedimiento aplicado

Existe un refinamiento que puede ser introducido para mejorar la interpolación de los registros en los centros de gravedad de los cuadrados de la malla y consiste en utilizar la técnica del Kriging (Metcalf, 1997). También se visualiza que todo el procedimiento descrito puede ser computarizado o bien desarrollado en un sistema de información geográfica, para su automatización. Lógicamente, para la cuantificación de las sequías se pueden utilizar otros índices, como el de la precipitación estandarizada (Velasco-Velasco, 2002; Mishra y Singh, 2008; González-Camacho *et al.*, 2011).

Por otra parte, el valle de San Luis Potosí es en realidad una cuenca pequeña dentro del análisis espacial de sequías, y por ello, los mapas construidos con las predicciones de los déficits anuales resultaron sumamente simples, mostrando los valores máximos en la zona montañosa del oeste del valle y los mínimos al norte. Sin embargo, en cuencas mayores, es muy probable que existan algunos puntos o cuadros con valores máximos y entonces habrá que estudiar diversas “evoluciones espaciales” de la sequía para obtener sus valores máximos contiguos, de manera similar a como se realizan los análisis de precipitación-área-duración, al procesar los variados “ojos de tormenta” encontrados en las curvas isoyetas (Pérez-Méndez y Campos-Aranda, 2000).

Conclusiones

Las curvas de severidad-área-frecuencia (SAF) se pueden construir en una cuenca o región previamente definida, para diversas *duraciones* de la sequía, por ejemplo 12, 6, 3 y 1 meses. Tales curvas mostrarán la *intensidad* de las sequías de acuerdo con el índice seleccionado y utilizado en su estimación; además, caracterizarán a las sequías en relación con el modelo de *comportamiento espacial* establecido por las predicciones procedentes del índice empleado. Las curvas SAF de una cuenca o región permiten su comparación con otras para apreciar sus diferencias, sean éstas en intensidad o en comportamiento espacial.

Estimadas las curvas SAF, permitirán caracterizar los años con sequías en tal cuenca o región, para observar cómo cambia su severidad a lo largo del área y dentro del periodo de retorno (frecuencia). Lo anterior ocurre al dibujar en las curvas SAF respectivas, los valores máximos contiguos del año con sequía histórica y observar que éstos las “cruzan hacia abajo”, indicando con ello que tal año comenzó con sequías muy intensas en áreas reducidas y después disminuyó en severidad, al abarcar más extensión, o por el contrario, empezó con baja intensidad y conforme fue creciendo

en área, la sequía fue cada vez más severa. Esto último no fue observado en las sequías históricas del valle de San Luis Potosí, quizás debido al tamaño reducido de su cuenca.

El procedimiento sugerido para estimar las curvas SAF de las sequías de una cuenca o región geográfica es bastante sencillo, y susceptible de mejorarse y automatizarse computacionalmente. Aunque resulta tedioso en la parte de estimación de los valores anuales y mensuales faltantes, la obtención y definición de un amplio periodo común en las estaciones pluviométricas utilizadas conducirá a predicciones más confiables y, por lo tanto, tales curvas SAF tendrán una mayor garantía o exactitud. Lógicamente, el uso de una red amplia y uniforme de pluviómetros conduce a unas curvas SAF confiables. Por lo anterior, estos dos aspectos del procedimiento requieren atención especial.

Agradecimientos

Se agradece al ingeniero Armando Rocha Hernández, jefe del Centro de Previsión Meteorológica de la Dirección Estatal San Luis Potosí de la Conagua, el haber proporcionado al autor toda la información de lluvias mensuales disponible en las diez estaciones pluviométricas procesadas.

Se agradecen las observaciones y correcciones de los tres árbitros anónimos, las cuales permitieron volver más explícito el procedimiento sugerido, así como detallar sus alcances y limitaciones.

Recibido: 14/05/12

Aceptado: 14/01/13

Referencias

- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Agroclimatología cuantitativa de cultivos*. Apéndice B: FDP Gamma Mixta, pp. 267-281 y Anexo C: ¿Qué son las sequías? México, D.F.: Editorial Trillas, 2005, pp. 283-291.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Contraste de un método simple de transferencia de información para estimación de volúmenes escurridos mensuales. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 2, abril-junio de 2008, pp. 153-165.

- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Introducción a la hidrología urbana*. Capítulo 3: Técnicas estadísticas y probabilísticas. San Luis Potosí, México: edición del autor, 2010, pp. 25-51.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Estimación de la severidad de sequías ambientales mediante registros de lluvia mensual. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. III, núm. 1, enero-marzo de 2012, pp. 123-130.
- GONZÁLEZ-CAMACHO, J.M., PÉREZ-RODRÍGUEZ, P. y RUELLE, P. Estimación de índices normalizados de lluvia mediante la distribución Gamma generalizada extendida. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. II, número 4, octubre-diciembre de 2011, pp. 65-76.
- INEGI. Carta Topográfica 1:250 000 San Luis Potosí F14-4. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1996.
- KITE, G.W. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Fort Collins: Water Resources Publications, 1977, pp. 156-168.
- METCALFE, A.V. *Statistics in Civil Engineering*. Theme 7.5: Spatial processes, London: Arnold Publishers, 1997, pp. 217-231.
- MISHRA, A.K. and SINGH, V.P. Development of drought SAF curves. Chapter 23. In *Hydrology and Hydraulics* Vijay P. Singh (editor). Colorado: Water Resources Publications, Highlands Ranch, 2008, pp. 811-833.
- MORENO-CASTRO, D., CAMPOS-ARANDA, D.F. CISNEROS-ALMAZÁN, R. *Estadística climatológica del observatorio meteorológico de San Luis Potosí (1987-2000)*. San Luis Potosí: México Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2004, 79 pp.
- PÉREZ-MÉNDEZ, A. y CAMPOS-ARANDA, D.F. *Análisis y contraste de tipo P-A-D del huracán Gert*. XVI Congreso Nacional de Hidráulica, Morelia, Michoacán, del 8 al 10 de noviembre de 2000, pp. 109-114.
- SHEFFIELD, J. and WOOD, E.F. *Drought. Past problems and future scenarios*. Chapter 3: The Science of Drought, and Chapter 4: Quantifying Drought. London: Earthscan, Ltd., 2011, pp. 17-70.
- TALLAKSEN, L.M. and VAN LANEN, H.A.J. (editors). *Hydrological Drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Part I: Drought as a Natural Hazard, and Chapter 5: Hydrological Drought Characteristics. Amsterdam: Elsevier B.V. 2004, pp. 3-96, 139-198.
- VELASCO-VELASCO, I. *Plan de preparación para afrontar sequías en un distrito de riego*. Anexo 26: Detalle teórico metodológico del SPI. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería. México, D.F.: División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, 2002, pp. 188-195.

Abstract

CAMPOS-ARANDA, D.F. Meteorological drought characterization using severity-area-frequency curves, in San Luis Potosi Valley of Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 3, July-August, 2013, pp. 165-186.

This work is composed of three sections. The first briefly discusses general ideas about droughts, including definitions and types. The second section provides a detailed presentation of the procedure suggested to estimate severity-area-frequency curves (SAF). The third part describes a numerical application for the valley of the city of San Luis Potosi, Mexico. The proposed sequence consists of five basic stages: (1) compilation and selection of records to be used, (2) spatial interpolation of records, (3) calculation of annual rainfall deficits, (4) probabilistic processing of annual deficits and (5) construction of SAF curves. The temporal and spatial characteristics of the droughts are essential to understand their behavior and evolution in a watershed or specific region. The procedure for a regional estimation of the SAF curves was established using one of the simplest indices to characterize droughts and a basic spatial interpolation technique. This included the use of the generalized extreme values distribution to obtain predictions that define the frequency of these curves. Lastly, conclusions are formulated which point out the usefulness of SAF curves to compare droughts between regions and to interpret years of historical drought. The simplicity of the proposed method is also shown and the first stage is indicated as the most critical.

Keywords: monthly precipitation, median values, homogeneity, spatial interpolation, predictions, GEV distribution.

Dirección institucional del autor

Dr. Daniel Francisco Campos-Aranda

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Genaro Codina 240, Colonia Jardines del Estadio

78280, San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO

Teléfono: +52 (444) 8151 431

campos_aranda@hotmail.com