

## Análisis del índice de sequía en caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma

*Analysis of hydrological drought index (SDI) using natural runoff in the mexican watershed of the river Lerma*

Ulises Salvador Díaz Barriga Arroyo<sup>1\*</sup>, Raúl López Corzo<sup>2</sup>, Teresa Lluviaria Ortiz Aguilar<sup>2</sup>, Irving Torres Miranda<sup>1</sup>, Enrique Galván Vargas<sup>1</sup>

Recibido: 14/06/2019

Aceptado: 14/08/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El interés de generar una alternativa de cuantificación para el pronóstico y evolución de la sequía empleando índices o indicadores que se usan a nivel mundial, ha generado la oportunidad de presentar los elementos e instrumentos que pueden ser fundamentales para el desarrollo y aplicación de las metodologías dentro de esta investigación. El recurso hídrico es un factor indispensable que interviene en distintos procesos de la humanidad. Por lo tanto, la escasez de este recurso genera graves conflictos entre los usuarios y las dependencias encargadas de regular el uso de las aguas nacionales. Actualmente existen distintas instituciones que se dedican a diseñar o aplicar índices de sequía tanto en el ámbito nacional como a nivel mundial. En México, es de particular interés el análisis, monitoreo o seguimiento de la sequía meteorológica e hidrológica; de tal forma que se han creado Programas de Prevención contra la Sequía. En el presente trabajo de investigación, se estimó el escurrimiento natural utilizando la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2015) en la cuenca del río Lerma. Posteriormente, se calculó el Índice de Sequía en Caudales (SDI, por sus siglas en inglés) empleando escurrimiento natural (restituido) y a su vez sobre registros hidrométricos, ambos criterios fueron evaluados por un segundo índice, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) es una variable completamente independiente dado que emplea precipitación. Finalmente, se estableció una correlación entre ambos índices de sequía (SDI y SPI), y se identificó la metodología que mejor caracteriza a una sequía hidrológica.

**Palabras clave:** correlación, escurrimiento, índice, indicadores, sequía, SDI, SPI.

### Abstract

*The interest of generating an alternative of quantification for the forecast and evolution of the drought using indices or indicators that are used worldwide, has generated the opportunity to present the elements and instruments that can be fundamental for the development and application of the methodologies within of this research. The water resource is an indispensable factor that intervenes in different processes of humanity. Therefore, the scarcity of this resource generates serious conflicts between users and the agencies in charge of regulating the use of national waters. Currently, there are different institutions that are dedicated to designing or applying drought indices both nationally and globally. In Mexico, the analysis, monitoring or follow-up meteorological and hydrological drought is of particular interest; in such a way that Drought Prevention Programs have been created. In this research work, natural runoff was estimated using the Official Mexican Standard (NOM-011-CONAGUA-2015) in the Lerma river basin. Subsequently, the Streamflow Drought Index (SDI) was calculated using natural runoff (restored) and in turn on hydrometric records, both criteria were evaluated by a second index, the Standardized Precipitation Index (SPI), is a completely independent variable since it uses precipitation. Finally, a correlation was established between both drought index (SDI and SPI), and the methodology that best characterizes a hydrological drought was identified.*

**Keywords:** correlation, runoff, index, indicators, drought, SDI, SPI.

1 Comisión Nacional del Agua, México. Calzada México-Xochimilco 4985, Coapa, Guadalupe, 14388 Ciudad de México, CDMX, email: ulises.diaz@conagua.gob.mx, irving.torresm@conagua.gob.mx y enrique.galvanv@conagua.gob.mx

2 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Paseo Cuauhnáhuac, 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, CP 62550, Tel. +52 (777) 3293600, México, email: raul\_lopez\_corzo@hotmail.com y teresa\_ortiz@tlaloc.imta.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo y análisis de la sequía en México ha sido de gran importancia en los últimos años, a tal grado que se ha puesto énfasis en estudiar el comportamiento de la sequía meteorológica e hidrológica; contando con organismos que destinan sus recursos para la caracterización de los eventos secos (CONAGUA, 2015). El Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), se creó en el 2013 con la finalidad de estimar los periodos secos o húmedos a partir de las dos variables más importantes; tales como; la precipitación y el escurrimiento. Algunos de los instrumentos aplicados por la PRONACOSE son el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en ingles) y el Índice de Sequía en Caudales o Escurrimientos (SDI, por sus siglas en ingles).

Los índices de sequía son medidas cuantitativas que caracterizan niveles de severidad mediante la asimilación y entendimiento de una o varias variables (indicadores); es este caso uno de esos indicadores son la precipitación y el escurrimiento; los cuales son dos variables completamente independientes (Esquivel *et al.*, 2014).

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) se basa solo en la precipitación (Hayes *et al.*, 1999), de tal manera que este índice caracteriza a una sequía meteorológica. El SPI fue desarrollado para categorizar precipitaciones como una desviación con respecto a una función normalizada de distribución de probabilidad de la precipitación (McKee *et al.*, 1995).

De acuerdo, con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), órgano operador en México; la ventaja que ofrece este índice es que cubre diferentes escalas de tiempo y puede aplicarse a los datos de precipitación de una estación climatológica. Por otra parte, el estudio de la sequía hidrológica mediante el Índice de Sequía en Caudales o Escurrimientos (SDI), fue desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2009); el cual permite determinar un evento seco a partir de los datos de caudal o escurrimiento; utilizando como base la metodología y los cálculos del índice SPI (OMM, 2016).

El SDI se basa en los volúmenes de caudales o escurrimientos acumulados por periodos escalonados de tres, seis, nueve y doce meses dentro de cada año hidrológico (Nalbantis, 2008), mediante la estandarización de las variaciones de los escurrimientos con respecto a su media, suponiendo que siguen una distribución normal. Por lo general, el escurrimiento sigue una probabilidad de distribución sesgada, la cual puede aproximarse a la familia de las funciones de distribución gamma (Arreguín *et al.*, 2016).

La presente investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento de la sequía hidrológica en una cuenca mexicana (río Lerma) al aplicar el SDI (*Streamflow Drought Index*) sobre escurrimientos naturales por cuenca propia, con base en la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2015) y a su vez sobre datos directos de hidrometría; es decir se estudiarán y compararán estos dos casos que en la práctica son empleados.

La hipótesis está sustentada en que los datos medidos en una estación hidrométrica sufren una alteración debido a los efectos antropogénicos que ocurren aguas arriba de la misma; lo cual queda resuelto si se realiza un balance hidrológico al funcionamiento hidráulico de la cuenca, obteniendo un escurrimiento natural restituído. Para ello, se realizó un análisis de la sequía hidrológica dentro de la cuenca del río Lerma en un periodo de 1980 al 2014. Finalmente, para determinar la veracidad de esta investigación se realizó una correlación entre el índice SDI (empleando ambas metodologías) y el índice SPI; este último es completamente independiente dado que utiliza datos de precipitación.

De tal manera que, al obtener dicha correlación se determinara que metodología; en el caso del índice SDI, es la que mejor se ajusta para analizar una sequía hidrológica.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Zona de estudio

La cuenca del río Lerma es una de las más complejas e importantes en México, está integrada por los ríos Lerma, La Gavia, Jaltepec, La Laja, Turbio, Angulo y Duero (figura 1), se ubica en los Estados de Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Querétaro y Estado de México, forma parte de la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago con una extensión de 54,448 km<sup>2</sup>, ubicada en el centro occidente del país entre los paralelos 19° 02' y 21° 34' de la latitud norte y de los meridianos 99° 17' y 103° 30' de longitud oeste. El clima predominante en la cuenca del río Lerma es el semi-cálido sub-húmedo, su temperatura media anual es mayor a 18°C y el promedio anual de precipitación es del orden de 810 mm (4% por arriba de la media nacional mexicana, que es de 77 mm) y la evapotranspiración media anual es de 665 mm (CONAGUA, 2016).

El cauce principal de la cuenca es el río Lerma; el cual nace a 4,600 msnm con una longitud de 708 km y se mueve a lo largo de la cuenca hasta desembocar en el Lago de Chapala a 1,600 msnm. El Lago de Chapala es el cuerpo de agua natural más grande de México con una longitud de 77 km y un ancho de 22 km. La cuenca Lerma se subdivide en 19 subcuencas considerando las cuencas cerradas del Lago de Pátzcuaro y Cuitzeo. Sin embargo, estas dos últimas no se consideran dentro del funcionamiento hidráulico de la cuenca, dado que no aportan ningún volumen de escurrimiento superficial al cauce principal. Además, en su interior se ubican las presas José A. Álzate, Ignacio Ramírez, Tepetitlán, Tepuxtepec, Solís, Ignacio Allende, Melchor Ocampo, así como los embalses naturales: el Lago de Chapala y la Laguna de Yuriria; mismas que serán analizadas en el presente trabajo de investigación (Díaz-Barriga, 2018).

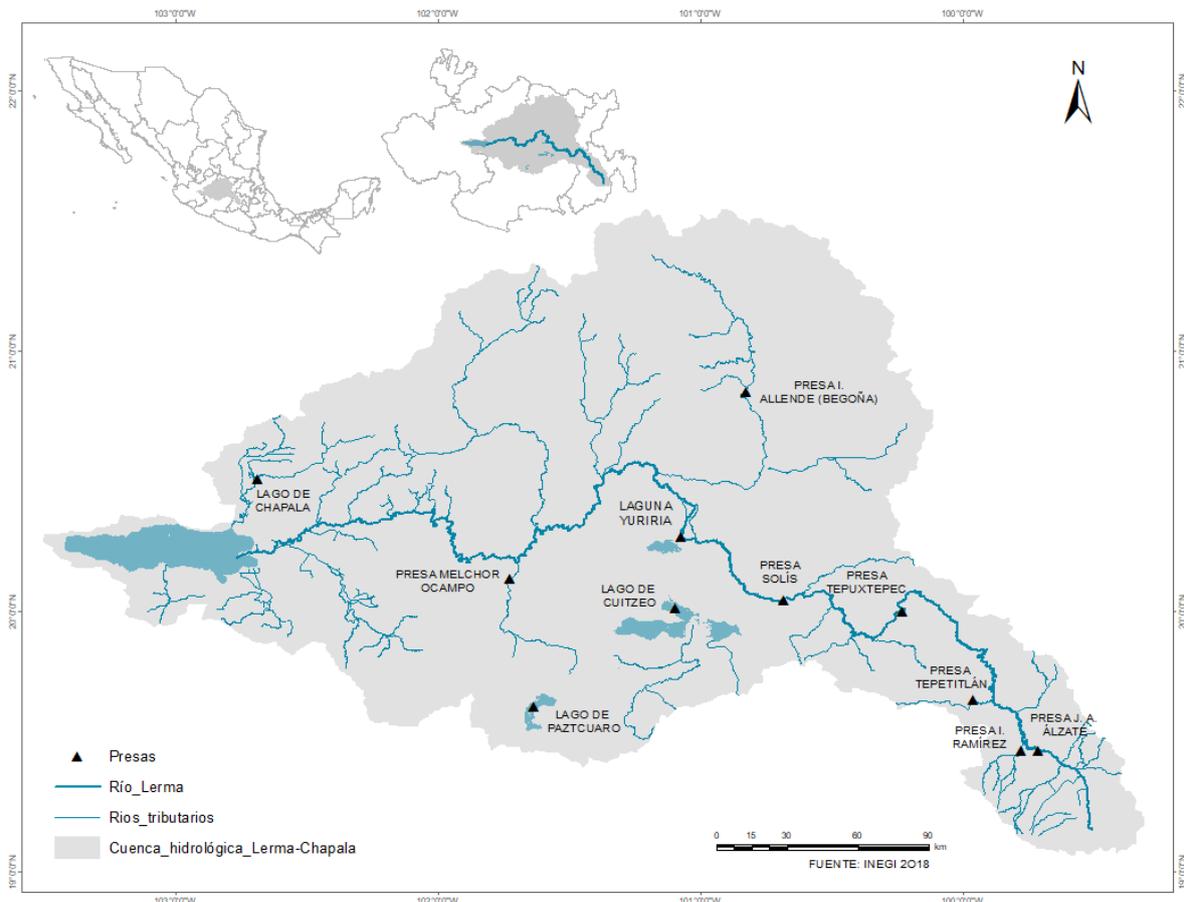


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio.

## 2.2 Ecuaciones básicas

El escurrimiento natural por cuenca propia ( $C_p$ ) se define en la NOM-011-CONAGUA-2015 como el “volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica” (SEMARNAT, 2002). Pero el escurrimiento natural también puede definirse como aquel volumen que escurre removiendo los efectos antropogénicos (actividad humana) de la cuenca en estudio. Su determinación requiere el ajuste

de los registros históricos de escurrimiento en las estaciones hidrométricas, quitando o removiendo los efectos que los grandes embalses artificiales (presas) o naturales (lagos, lagunas) generan al almacenar agua; así como, la derivación, el aprovechamiento para los diferentes usos, entre otros factores que contribuyen a la alteración de dichos registros (Silva, 2010). El escurrimiento natural anual o escurrimiento anual por cuenca propia ( $C_p$ ) de acuerdo a con lo publicado en la NOM-011-CONAGUA-2015, se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_p = (A_b + E_v + E_x + U_c) - (A_r + R + I_m + \Delta_v) \quad (1)$$

Donde:

$C_p$	=	volumen de aportación por cuenca propia ( $hm^3$ )
$A_b$	=	volumen anual aforado de la cuenca aguas abajo ( $hm^3$ )
$E_v$	=	volumen anual de evaporación ( $hm^3$ )
$E_x$	=	volumen anual de exportaciones ( $hm^3$ )
$U_c$	=	volumen anual de extracción de agua superficial para diferentes usos ( $hm^3$ )
$A_r$	=	volumen anual aforado desde la cuenca aguas arriba ( $hm^3$ )
$I_m$	=	volumen anual de importaciones ( $hm^3$ )
$R$	=	volumen anual de retornos ( $hm^3$ )
$\Delta_v$	=	cambio o variación de almacenamiento anual ( $hm^3$ )

Para determinar el escurrimiento natural de la cuenca del río Lerma, se sumaron los escurrimientos generados por las sub-cuencas de los ríos La Gavia, Jaltepec, La Laja, Turbio, Angulo y Duero (figura 1), el periodo de análisis es del año 1980 a 2014, resultado así un gasto promedio de  $423.1 \text{ hm}^3/\text{mes}$  y un promedio anual de  $5,076.7 \text{ hm}^3$  (figura 2). Del análisis de la figura 2, podemos determinar que el escurrimiento natural por cuenca propia ( $C_p$ ) presenta un buen comportamiento a lo largo de la historia. Sin embargo, en el año del 2012 presenta un escurrimiento promedio anual de  $3,887.4 \text{ hm}^3$ ; registro que esta 23.93% por debajo de la media anual en la cuenca. Dentro de la literatura, podemos corroborar que este registro es lógico con respecto a lo ocurrido en México en materia de sequías, dado que se registra un evento seco extremo en el periodo de 2011-2012; el cual fue uno de los eventos más devastadores del siglo XX en el territorio mexicano (CONAGUA, 2016).

A su vez se realizó el análisis de los registros de la estación hidrométrica Chapala, con el mismo periodo de observación (1980-2014). La EH Chapala se ubica a la entrada del Lago del mismo nombre (figura 1), siendo este el punto de control o de estudio para ambos métodos. Por lo que es posible, realizar una comparación dado que el balance hidrológico de la cuenca determina el escurrimiento natural generado hasta el Lago de Chapala. Del análisis de los registros de hidrometría se obtuvo un escurrimiento promedio del orden de  $393.2 \text{ hm}^3/\text{mes}$  y un promedio anual de  $4,718.05 \text{ hm}^3$  (figura 3). De acuerdo con la Figura 3, podemos observar que existe una variación considerable con respecto a los registros hidrométricos, en el año 2003 se registra un escurrimiento de  $12,451.58 \text{ hm}^3/\text{anual}$ ; valor que está por encima del promedio anual. Por lo que, se comprueba la hipótesis de la presente investigación; dado que estos registros se encuentran alterados por los efectos antropogénicos de la cuenca.

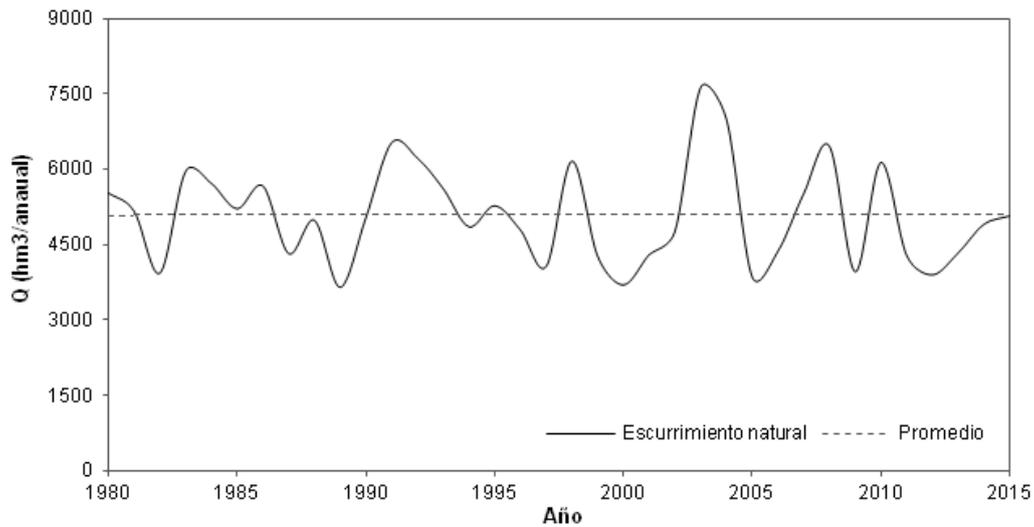


Figura 2. Hidrograma total de la cuenca del Río Lerma (1980-2014).

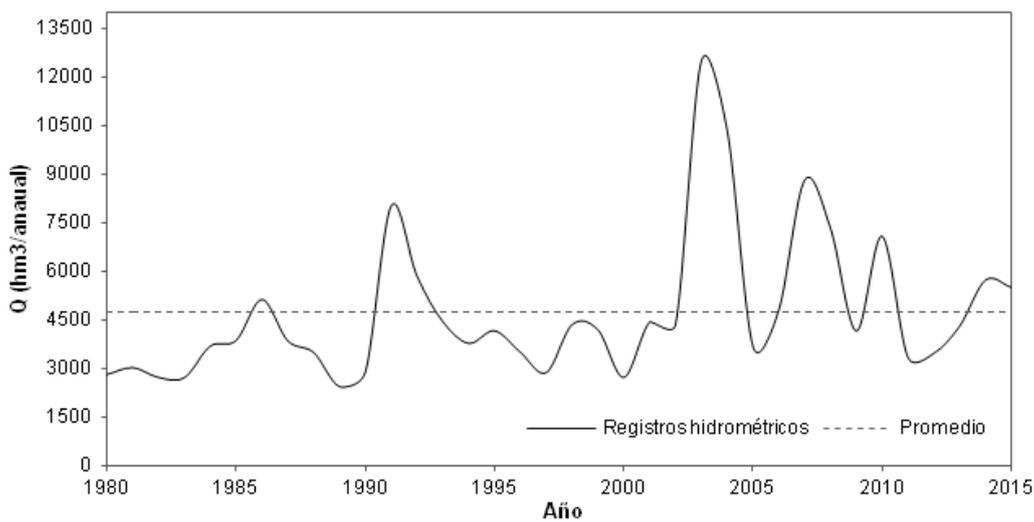


Figura 3. Hidrograma resultante de los registros de la EH Chapala (1980-2014).

Una vez obtenidos los escurrimientos naturales por cuenca propia ( $C_p$ ) y los registros históricos en la estación hidrométrica Chapala, se procedió a la aplicación del Streamflow Drought Index (SDI) creado por Nalbantis (2008) y Nalbantis y Tsakiris (2009). El SDI utiliza volúmenes acumulados de escurrimiento o caudal que se basan en periodos de tres, seis, nueve y doce

meses, los cuales se superponen para tener periodos de referencia dentro de cada hidrológico (Nalbantis, 2008). Para estimar este índice se requiere contar con una serie de escurrimiento o caudal mensual con registros continuos de 20 a 25 años para que el análisis sea estable (OMM, 2016). El SDI se define como:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad (2)$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen de escurrimiento acumulado en el año  $i$  trimestre  $k$ , es la media observada para el trimestre acumulado  $k$  y  $S_k$  es la desviación estándar en el periodo  $k$ . El valor de  $k$  es variable, así que  $k_1$  considera los volúmenes de octubre a diciembre,  $k_2$  de octubre a marzo,  $k_3$  de octubre a junio y  $k_4$  de octubre a

septiembre; el cual corresponde al año hidrológico completo (CONAGUA, 2012). Los valores que definen los estados de la sequía hidrológica mediante el uso del índice SDI se muestran en la tabla 1. En donde podemos observar que estos estados están asociados a una probabilidad ( $P$ ) y un periodo de retorno ( $T_r$ ).

Tabla 1. Definición de los estados de la sequía hidrológica mediante el SDI.

Estado	Descripción	Criterio	Probabilidad (%)	$T_r$ (años)
0	Sin sequía	$SDI \geq 0.0$	50.0	2.0
1	Sequía suave	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	34.1	2.9
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2	10.9
3	Sequía severa	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4	22.7
4	Sequía extrema	$SDI < -2.0$	2.3	43.5

Fuente: (López *et al.*, 2016).

En este sentido y considerando el planteamiento de (Nalbantis, 2008), es posible establecer series de tiempo mensuales de escurrimientos  $Q_{i,j}$ ;

donde  $i$  denota el año hidrológico y  $j$  el mes dentro de ese año hidrológico ( $j = 1$  para octubre y  $j = 12$  para septiembre):

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1,2,3, \dots, n; \quad j = 1,2,3, \dots, 12; \quad k = 1,2,3,4 \quad (3)$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen de caudal acumulado en el año hidrológico  $i$ -ésimo y  $k$  el periodo de referencia. Una vez definida de manera general la aplicación del método, a continuación, se presentan los resultados y análisis de los casos planteados. La distribución se transforma en una función normal, de tal manera que se propone utilizar la distribución log-normal de dos

parámetros; la cual fue propuesta por (Nalbantis, 2008) y (Nalbantis *et al.*, 2009). La normalización de estos valores se realiza mediante la obtención de los logaritmos naturales de los escurrimientos naturales o caudales. Por lo tanto, el índice SDI se define de la siguiente manera:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad k = 1,2,3,4 \quad (4)$$

donde

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad k = 1,2,3,4 \quad (5)$$

Son los logaritmos naturales del escurrimiento o caudal acumulado con media  $\bar{y}_k$  y desviación estándar  $S_{y,k}$  estadísticos estimados sobre un largo periodo de tiempo (Nalbantis, 2008). Con base en la ecuación 2, se estimó el índice SDI para los diferentes periodos de referencia ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$ ), aplicando la metodología antes descrita a los escurrimientos naturales restituidos

y a su vez a los registros históricos de la estación hidrométrica Chapala como se muestra en las figuras 4 a 7 del apartado de resultados y discusión. El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) desarrollado por McKee *et al.*, (1995), se basa en la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal (OMM, 2006). El cálculo del índice SPI tiene como base una función de

densidad de probabilidad Gamma (McKee *et al.*, 1995). Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son estimados para cada escala de tiempo. Posteriormente la probabilidad acumulada  $H(x)$  es transformada a una variable normal estandarizada con media cero y varianza uno, cuyo valor es el SPI

(García, 2014). El valor del SPI es más fácilmente obtenido usando una aproximación propuesta en 1965 que convierte la probabilidad acumulada a la variable normalizada  $Z$  a través de la siguiente expresión:

$$Z = SPI = - \left( t - \frac{C_0 + C_1 + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (6)$$

$$t = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad (7)$$

Las ecuación 6 y 7 son válidas para un intervalo de  $0 < H(x) < 0.5$  y el valor de los coeficientes para la ecuación 6 son:  $C_0=2.515517$   $d_1=1.432788$ ;  $C_1=0.802853$   $d_2=0.189269$ ;

$C_2=0.010328$   $d_3=0.001308$ . En la tabla 2 se muestra la clasificación del SPI, así como su probabilidad de recurrencia.

Tabla 2. Probabilidad de recurrencia del índice SPI.

Valor del SPI	Categoría	Probabilidad (%)
2.00 o mayor	Extremadamente húmedo	2.3
1.50 a 1.99	Muy húmedo	4.4
1.00 a 1.50	Moderadamente húmedo	9.2
-0.99 a 0.99	Normal	68.2
-1,00 a -1.50	Sequía moderada	9.2
-1.50 a -2.00	Sequía intensa	4.4
-2.00 o menor	Sequía extrema	2.3

Fuente: (McKee *et al.*, 1995)

Para determinar que metodología con respecto a la estimación del índice SDI, es la que mejor representa el comportamiento histórico de una sequía hidrológica dentro la cuenca del río Lerma; se realizó un análisis adicional para la calibración de los resultados, estimando para ello el índice SPI; el cual es completamente independiente al SDI y se basa en los registros de precipitación para los mismos periodos de referencia (escalas). Por lo que, es posible sobre poner a ambos índices en un mismo gráfico; cabe mencionar que existe un desfase natural entre la precipitación y el escurrimiento (CONAGUA, 2016). De tal manera, que es posible que exista una ligera diferencia al momento de caracterizar una sequía meteorológica e hidrológica, como se observa en las figuras 4 a 7.

### 3. RESULTADOS

Finalmente, se realizó un análisis para cada uno de los periodos de referencia del Índice de Sequía en Caudales. En la figura 4 se muestra el valor del SDI ( $k_1$ ) que considera el período octubre a diciembre, empleando datos de escurrimiento natural y a su vez sobre registros de hidrometría. Se puede observar que existe una diferencia al caracterizar la sequía para este periodo, dado que el SDI ( $k_1$ ) escurrimiento natural en la serie 2012-2013 estima una sequía extrema, mientras que utilizando hidrometría caracteriza con una sequía suave (ver tabla 1). Caso similar ocurre en el periodo 2005-2006 donde al emplear escurrimiento natural caracteriza con mayor intensidad. De la figura 5, se determina que en el caso del SDI ( $k_2$ ) escurrimiento natural presenta cinco años de

sequía moderada y episodio de sequía extrema en 2012-2013, el cual corresponde con la caracterización del SPI (6) equivalente a una sequía intensa en el periodo 2011-2012; es importante mencionar que existe un desfase natural entre la precipitación y el escurrimiento (CONAGUA, 2016), por lo que el análisis resulta bastante adecuado. En el caso de la estimación con registros hidrométricos se presentan tres años de sequía moderada, tres periodos de sequía severa y un episodio de sequía extrema (1982-1983). Además, es importante mencionar que no coincide ningún periodo de caracterización de eventos secos entre la aplicación de ambos métodos para el caso del SDI. Asimismo, en la figura 6 se observa que para el SDI ( $k_3$ ) escurrimiento en el periodo 2012-2103 se intensifica a una sequía extrema,

siendo que el SPI (9) presenta la misma intensidad. En el caso del escurrimiento natural para el periodo de referencia SDI ( $k_4$ ) año hidrológico completo, se presentan seis años de sequía moderada y dos años de sequía extrema (1988-1989 y 1999-2000); mientras que al emplear hidrometría indica que tan solo cinco ocasiones se presentó sequía moderada (ver figura 7). A su vez, podemos determinar que el SPI (12) presenta cuatro episodios de sequía moderada, un año de sequía intensa y uno de sequía extrema (2012-2013) de acuerdo con la clasificación de la tabla 2. De tal manera que, el análisis del SPI en cualquier escala detecta el evento meteorológico más devastador del siglo XX dentro del territorio mexicano (CONAGUA, 2016).

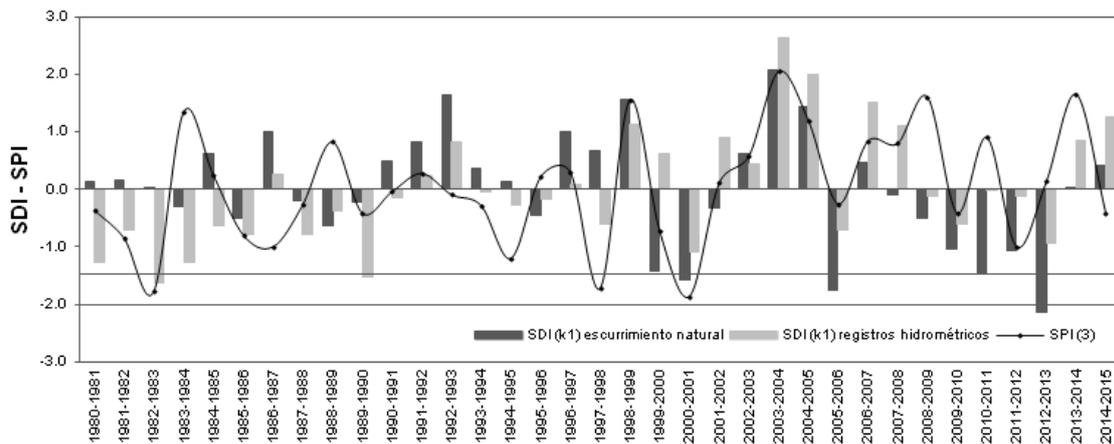


Figura 4. Series de los índices SPI (3 meses) y SDI ( $k_1$ ) octubre-diciembre aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos

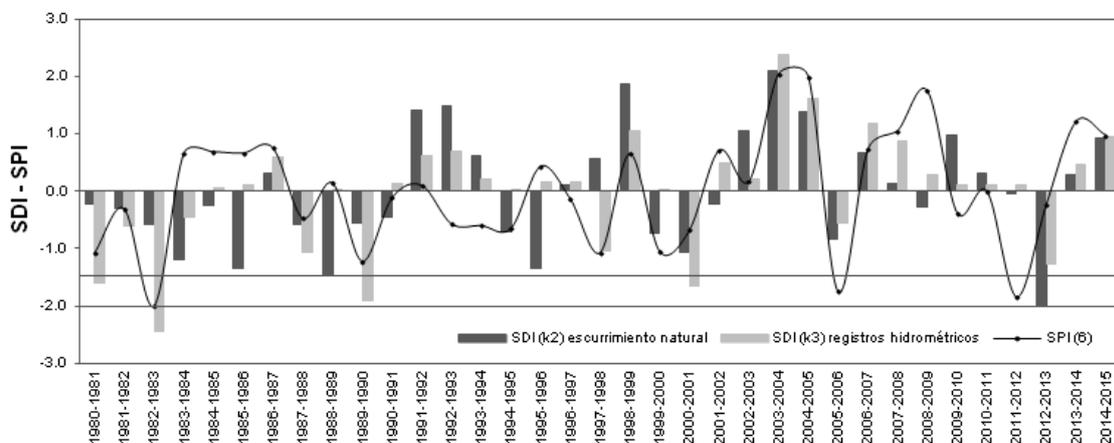


Figura 5. Series de los índices SPI (6 meses) y SDI ( $k_2$ ) octubre-marzo aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos

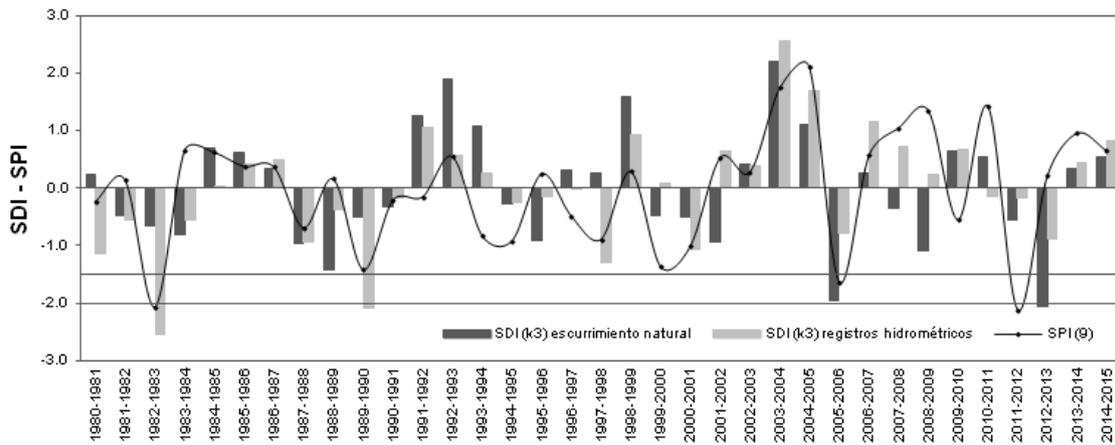


Figura 6. Series de los índices SPI (9 meses) y SDI ( $k_3$ ) octubre-junio aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos

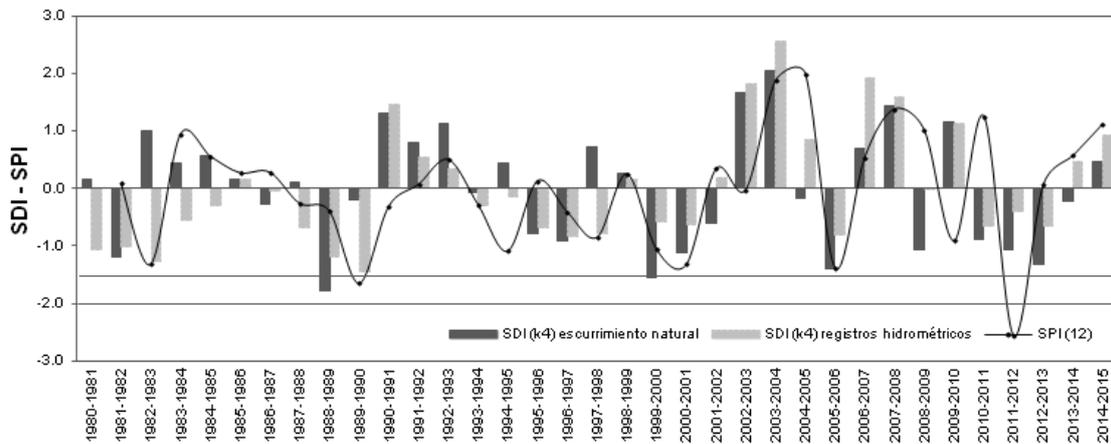


Figura 7. Series de los índices SPI (12 meses) y SDI ( $k_4$ ) octubre-septiembre aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos.

#### 4. DISCUSIÓN

Se determinó el grado de correlación de ambos índices de sequía aplicando el coeficiente de escurrimiento de determinación ( $R^2$ ); en el caso del SDI se correlacionaron ambos casos de estudios a) escurrimiento natural y b) registros hidrométricos. En la figura 8 se muestra el grafico de correlación de los índices SDI ( $k_4$ ) y SPI (12); dado que este periodo de referencia es el que presenta una mejor correlación entre ambos índices de sequía. De tal manera, que al aplicar el coeficiente  $R^2$  podemos observar que en el caso a) escurrimiento natural se tiene un grado de relación de 0.4134; mientras que en el caso b) registros de hidrometría, se obtuvo un

valor de 0.3054. De acuerdo con la clasificación del coeficiente  $R^2$  (ver tabla 3) se tiene que la relación del SDI ( $k_4$ ) escurrimiento natural y SPI (12) es regular; caso contrario ocurre con la aplicación a los registros hidrométricos, obteniendo una mala correlación de variables. Finalmente, del análisis de las figuras 4 a 7, se observa una diferencia importante entre la sequía que produce cada serie de escurrimiento natural con respecto a los registros de hidrometría; las cuales en estricto sentido deberían coincidir dado que se trata de la misma cuenca de estudio. Sin embargo, podemos notar que existe una buena correlación entre el índice SDI ( $k_4$ )

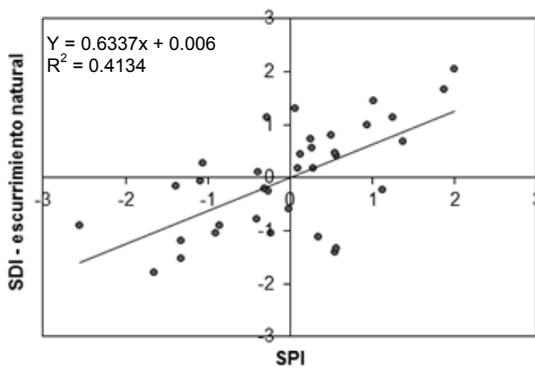
escurrimiento natural y SPI (12), debido a que ambas metodologías detectan ciertos periodos secos y húmedos. Obsérvese de la figura 1 que los registros hidrométricos están sujetos a la operación de las presas aguas arriba de la cuenca; por lo que se considera que estos

registros sufren una alteración considerable y, en consecuencia hace que se suavice la caracterización de la sequía hidrológica dentro de la cuenca, por lo que la hipótesis planteada al inicio de la presente investigación es correcta.

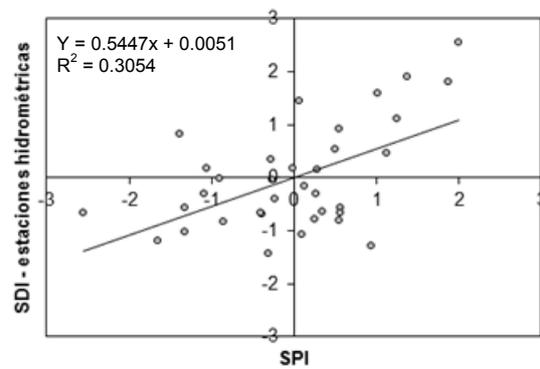
Tabla 3. Clasificación del coeficiente de correlación  $R^2$ .

Menor de 0.30	0.30 a 0.40	0.40 a 0.50	0.50 a 0.85	Mayor de 0.85
Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Sospechoso

Fuente: (Díaz Barriga, 2018).



(a)



(b)

Figura 8. Recta de ajuste del SDI ( $k_4$ ) a) escurrimiento natural y b) registros hidrométricos, con respecto al índice SPI (12).

## 5. CONCLUSIONES

La obtención del escurrimiento natural por cuenca propia con base en la NOM-011-CONAGUA-2015, nos permite determinar un valor de escurrimiento (casi) real; dado que como se mencionó anteriormente; esta metodología remueve los efectos antropogénicos de la cuenca en estudio; determinando que existe una variación entre el escurrimiento restituído y los registros de hidrometría (ver figura 2 y 3); por lo que la hipótesis planteada con respecto a la alteración de los registros de las estaciones hidrométricas ubicadas aguas abajo de un embalse artificial (presa) es correcta, debido a que estos datos (aforados) están sujetos al operación y/o funcionamiento de las presas ubicadas aguas arriba o en su caso por la incorporación de volúmenes de agua provenientes de algún Distrito de Riego

(conocido como volúmenes de retorno). Si bien es cierto, esta metodología solo puede ser aplicable a cuencas aforadas, dado que se debe conocer los volúmenes de cada una de las variables que se encuentran relacionadas en la ecuación 1 de la presente investigación.

Con respecto al SDI, se determina que la variable de entrada al índice no afecta el análisis del mismo. Sin embargo, podemos decir que la metodología que presenta un mayor ajuste al momento de caracterizar un evento seco o húmedo con respecto a lo históricamente observado y/o documentado, es el uso de escurrimientos naturales (ver figura 4 a 7); caso contrario ocurre si se aplica a datos directos de hidrometría (aplicación actual), debido a que suaviza los efectos de la sequía; por lo que no representa realmente lo ocurrido durante este fenómeno natural. No obstante para que el análisis sea estable se requiere de una serie

mínima de 25 años efectivos. Por otra parte, la aplicación del SDI sobre escurrimientos naturales (restituidos) puede contribuir a corto, mediano y largo plazo estableciendo políticas hídricas de extracción y almacenamiento con respecto al funcionamiento hidráulico (presas) de la cuenca en estudio, ya que el conocimiento de la ocurrencia de una sequía puede ayudar en la mitigación, planeación y manejo del recurso hídrico a largo plazo. Asimismo, el calcular el SDI para distintos periodos de referencia (escalas) ayuda a comparar el comportamiento del escurrimiento a lo largo del año hidrológico; el cual en México comienza en octubre y termina en septiembre del año siguiente.

Finalmente, la estimación del índice SPI nos permite calibrar los resultados obtenidos con respecto al SDI, dado que es un índice que emplea una variable completamente independiente al análisis anterior (precipitación). Además, es posible sobre poner a ambos índices en un mismo gráfico, debido a que el SPI se basa en la metodología del SDI, utilizando los mismos periodos de referencia 3, 6, 9 y 12 meses equivalentes a  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$ . En el caso particular del SPI (12) y SDI ( $k_4$ ) escurrimiento natural presenta un buen ajuste (figura 7) y ambos caracterizan de manera similar los

eventos secos y húmedos presentados históricamente en la cuenca del río Lerma. Por otra parte, en el caso del SPI (12) y SDI ( $k_4$ ) registros hidrométricos identifica algunos periodos de sequía con respecto al SPI aunque como se describió anteriormente, el análisis es más suave. Por último, se estableció una correlación con ambos casos a) escurrimiento natural y b) registros hidrométricos, el primer caso de acuerdo al coeficiente de correlación de  $R^2$  se obtuvo un valor de 0.4134, considerado como regular (ver tabla 3) y para el segundo caso obtenemos un valor de 0.3054 (malo). De tal manera, que se obtuvo una relación gráfica y numérica entre ambos índices de sequía (SPI y SDI), concluyendo que es mejor la aplicación del SDI sobre escurrimientos naturales por cuenca propia y, a su vez es posible asociar un evento de sequía meteorológica e hidrológica. Esta metodología, puede aplicarse a cualquier cuenca hidrológica, siempre y cuando este instrumentada o cuente con la suficiente información pluviométrica e hidrométrica. Se recomienda el uso de este método en una cuenca de menores dimensiones (pequeña) para ver el efecto o la relación entre ambos índices, determinando una mayor relación entre ambos.

## REFERENCIAS

- Arreguín, F., López, M., Ortega, D. y Ibáñez O., (2016). La Política Pública contra la Sequía en México: Avances, Necesidades y Perspectivas. *Revista de Tecnología y ciencias del Agua*, Vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 63-76, Jiutepec, Morelos, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030, Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo*. Marzo de 2012, México D.F.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2015). *Plan General Maestro Estratégico de Investigación*. Subdirección General Técnica. México, pp. 1-10.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2016). *Seguimiento y evaluación 2016 del decreto por lo que por causas de interés público se suprimen las vedas existentes en la subregión hidrológica Lerma-Chapala, y se establece zona de veda en las 19 cuencas hidrológicas que comprenden dicha subregión hidrológica*. Informe final, México, pp. 1-448.
- Díaz Barriga, U., López R. Mora, H. (2018). *Análisis y caracterización de la sequía empleando los índices SPI y SDI, aplicando escurrimiento natural. Caso de estudio: Cuenca hidrológica Lerma-Chapala*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México. 144 p.

- Esquivel, A., Palmira N., Sánchez-Cohen I., Velásquez-Valle M. y Esquivel O., (2014). Evaluación del Índice de Sequía de Caudales en Cuencas del Norte-Centro de México. *Revista AGROFAZ*, Vol. 14, Número 2, pp. 53-60.
- García, Rugerío Ernesto, (2014). *Tema de Maestría. Índices de vulnerabilidad de las sequías en la cuenca del río Bravo*. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado de Maestría y Doctorado de Ingeniería. Ingeniería Civil. Especialidad en Hidráulica, Ciudad de México, México, 143 p.
- Hayes, M., Svodoba D., Wilhite D., and Vanyarkho O., (1999). Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bull. American Meteorological Society*. No. 80, pp. 429-438.
- López, R., Ortiz T. y Cruz F., (2016). *Análisis de sequías para la subregión hidrológica Lerma-Chapala aplicando el Índice de Escurrimientos Estandarizados (Streamflow Drought Index, SDI) en México*. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú, septiembre 2016, pp. 30.
- McKee, B., Doesken N., and Kleist J., (1995). Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, *Nineth conf. on Applied Climatology*. Dallas. Texas. AMS, pp. 233-236.
- Nalbantis, I., (2008). *Evaluation of Hydrological Drought Index*. European Water Publications. Vol. 23/24, pp. 67-77.
- Nalbantis, I. and Tsakiris, G., (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*. Vol. 23, No. 5, 2009, pp. 881-897.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros*. No. 1006.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2016). *Manual de Indicadores e Índices de sequía*. No. 1773, pp. 1-46.
- Secretaría de Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (2002), NOM-011-CONAGUA-2015. *Conservación del recurso agua – Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de abril de 2002, pp. 2-18 (Primera Sección), México D.F.
- Silva, H., (2010). *Modelo Matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas*. Tesis Doctoral, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Posgrado. Chihuahua, Chih., marzo de 2010. pp. 39-40.

*Como citar este artículo:*

Díaz-Barriga, U., López, R., Lluviaria, T., Torres, I., Galván, E. (2019). Análisis del índice de sequía en caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma. *Aqua-LAC Volumen 11(2)*, 17-28. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-02



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license