

**Sensibilidad de índices de sequía dependiendo de la
longitud de registros climatológicos**

**Sensitivity of drought indices depending on the length
of climatological records**

Aleida Vilchis-Francés¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8637-2945>

Carlos Díaz-Delgado², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6245-070X>

¹Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua IITCA-UAEM,
Toluca, México, ayvilchisf@uaemex.mx

²Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua IITCA-UAEM,
Toluca, México, cdiazd@uaemex.mx

Autor para correspondencia: Carlos Díaz-Delgado, cdiazd@uaemex.mx

Resumen

Entre los diversos estimadores de sequía propuestos a nivel mundial no existe suficiente evaluación sobre cuál de ellos presenta menor incertidumbre al aplicarse en una región. Algunos índices han sido utilizados en territorios con geomorfología y regímenes climáticos específicos, así como con cierta disponibilidad de información meteorológica. Generalmente se cuenta con series cronológicas cortas de

las variables meteorológicas requeridas y se desconoce el error de estimación de la sequía asociada con esa longitud de series. Este trabajo presenta un proceso facilitador de la evaluación de la sensibilidad de los índices de sequía meteorológica en función de la información disponible. La sensibilidad se clasificó como excelente, buena, regular y mala de acuerdo con el error de estimación de los índices confrontado con series sintéticas de mil años. Las series sintéticas fueron generadas a partir de las características de la muestra real y funciones de distribución normal y gamma. Se identificó en los resultados que los índices CPI, PNI, RDI, SPI, SPEI y ZI son poco sensibles a la longitud de registros meteorológicos. En particular, SPEI deja de ser sensible a partir de longitudes de registro de 10 años; CPI, PNI, RDI, SPI y ZI, a partir de 20 años. EDI fue más sensible a la longitud de las series y se requirieron registros mayores a 30 años para mejorar su certeza. Por último, la fiabilidad de los índices fue mayor para series sintéticas diarias de P , $T_{\max}$ y $T_{\min}$ generadas con la función de distribución normal, así como en zonas con mayores P anuales.

Palabras clave: incertidumbre de sequía, error de estimación, índices de sequía meteorológica, precipitación, evapotranspiración, análisis probabilístico.

Abstract

Among the various drought estimators proposed worldwide, there is not enough evaluation as to which of them presents the least uncertainty when applied in a region. Some indices have been used in territories with specific geomorphology and climatic regimes, as well as certain availability of meteorological information. Generally, there are short time series of the required meteorological variables, ignoring the drought

estimation error associated with that length of series. This work presents a facilitating process to evaluate the sensitivity of meteorological drought indices based on the available information. Sensitivity was classified as excellent, good, medium and poor, according to the estimation error of the indices with respect to synthetic series of one thousand years. The synthetic series were generated from the characteristics of the real sample and the normal and gamma distribution functions. The results identified that the CPI, PNI, RDI, SPI, SPEI and ZI indices are not very sensitive to the extent of meteorological records. In particular, SPEI is no longer sensitive above 10-year record periods; CPI, PNI, RDI, SPI and ZI for 20 years. The EDI was more sensitive to the length of the series and required records of more than 30 years to improve its certainty. Finally, the reliability of the indices was greater for the daily synthetic series of P , $T_{\max}$ and $T_{\min}$ generated with the normal distribution function, as well as in areas with higher annual P .

Keywords: Uncertainty due to drought, estimation error meteorological drought indices, precipitation, evapotranspiration, probabilistic analysis.

Recibido: 17/06/2024

Aceptado: 16/02/2025

Publicado *ahead of print*: 20/03/2025

Versión final: 01/11/2025

Introducción

La sequía es un fenómeno natural y recurrente que se presenta en cualquier régimen hidrológico, pero también es uno de los fenómenos menos comprendido (Mahmoudi, Rigi, & Kamak, 2019). Debido a su lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, la sequía es difícil de detectar (Penalba & Rivera, 2015); esto provoca que los gobiernos incrementen la vulnerabilidad del socio-ecosistema ante la sequía por aplicación de políticas de gestión de recursos hídricos inadecuadas (PNUD, 2004). Por lo general, dichas políticas implican acciones reactivas cuando el evento ya está en desarrollo, en lugar de ser preventivas y de mitigación de impactos (Arrojo, 2008; Moneo, 2008).

Para entender la sequía se han creado múltiples definiciones para un uso y lugar específicos. Sin embargo, esta variabilidad dificulta la comparación de criterios por su falta de homogeneidad. Lo anterior ha llevado a proponer índices de sequía que buscan estandarizar su cuantificación y evaluación (González, 2005). Estos índices involucran una o más variables hidrológicas, como precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración, humedad del suelo, caudales en ríos, niveles en los acuíferos y almacenamientos en presas (Crespo, 2006). La mayoría de los índices de estimación de sequía tienen escalas de cuantificación diferentes: diaria, semanal, mensual, estacional y anual. Algunos de los índices más usados y evaluados en las últimas décadas han sido el índice estandarizado de precipitación (SPI) y el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI) (McKee, Doesken, & Kleist, 1993; Vicente-Serrano *et al.*, 2012). En estudios previos sobre uso de los índices de sequía, en la mayoría prevalece el aspecto meramente descriptivo, como los de Bordi y Sutera (2002);

Cancelliere, Di Mauro, Bonaccorso y Rossi (2005); Hallack-Alegria y Watkins (2006), y Fernández *et al.* (2009), donde desarrollan análisis pluviométricos para identificar periodos de sequías meteorológicas. De igual forma, los estudios de Fernández-Larrañaga (1997), Fernández y Buscemi (2000), Birkel (2006), y Yahiaoui, Tauaïba y Bouvier (2009) describieron sequías hidrológicas a partir de caudales en zonas específicas de Chile, Argentina, Costa Rica y Argelia, respectivamente. Aunque en las investigaciones de Aburrea y Cebrián (2002), Bayazit y Önöz (2005), y Nadarajah y Gupta (2006) se utilizaron series cronológicas de precipitación y caudales, los resultados solo describieron las características de los eventos de sequías ocurridas en sus respectivas zonas de estudio.

Se identificaron escasos estudios de sensibilidad de índices de sequía en función de la longitud de registros meteorológicos para evaluar la confiabilidad de aplicación de cada estimador. En la investigación realizada por Wu, Hayes, Wilhite y Svoboda (2005) se sugiere el uso de mayores longitudes de datos posibles, para que los valores de sequía con SPI sean más certeros. Por otro lado, en el trabajo de Bayissa *et al.* (2015) se usaron 14 estaciones climatológicas con 56 años de datos y 23 estaciones con 34 años de información para identificar si esas longitudes de registro eran suficientes para la identificación de los patrones de sequía meteorológica con el índice SPI en Etiopía. El estudio de Link, Wild, Snyder, Hejazi y Vernon (2020) concluyó que un conjunto de datos de 100 años es apenas la décima parte de la longitud necesaria para obtener un nivel de confiabilidad adecuada en la estimación de umbrales de sequía. Finalmente, de la revisión de la literatura se observó que el índice más utilizado en las últimas décadas para estimación de sequías fue el

SPI y para algunos casos de estudio solo se indicó la suficiencia del tamaño de la muestra de datos.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal proponer un proceso de análisis de sensibilidad a los índices más utilizados en la estimación de la probable ocurrencia de una sequía meteorológica. Con base en este proceso se cuantificó el nivel de certeza de los índices en función de la longitud de datos meteorológicos involucrados en su cálculo. Se pretende que este análisis sirva de apoyo en la selección del índice más adecuado para el sitio de estudio en particular. Con el empleo de este proceso se validó y caracterizó la certeza de los principales índices reconocidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para la estimación probabilística de la sequía meteorológica (OMM, 2016). Los índices considerados en este estudio fueron los siguientes: índice de precipitación normal (PNI), índice de cuartiles de precipitación (PCI), índice Z-score (ZI), índice estandarizado de precipitación (SPI), índice de precipitación efectiva (EDI), índice de reconocimiento de sequía (RDI) y el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI). El producto final consistió en proporcionar un árbol de decisiones con los límites de aplicación de cada índice y el nivel de certeza alcanzable de acuerdo con la longitud de registros climatológicos disponibles (precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima, según el índice en análisis). Cabe señalar que este trabajo se llevó a cabo con base en información de estaciones meteorológicas del altiplano mexicano, en particular del Estado de México.

Los objetivos específicos del trabajo fueron los siguientes: a) generar series sintéticas de mil años con datos históricos diarios de precipitación y temperaturas, mediante funciones de distribución normal (o normal truncada cuando la variable bajo análisis solo puede tomar

valores positivos) y gamma, para ser utilizados en las estimaciones de índices de sequía; b) extraer 25 series aleatorias de cada una de las diversas longitudes de registro consideradas (10, 20, 30, 50, 100, 250, 500 y 750 años) para estimar los diferentes índices de sequía; c) contrastar los valores de los índices estimados con base en las series aleatorias para cuantificar los niveles de certeza de los índices; d) construir un árbol de decisión de la sensibilidad de los índices de sequía meteorológica en función de la longitud de los datos para orientar la elección del índice más deseable a utilizar en una zona de estudio.

Materiales

Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la región del altiplano central de México (Figura 1). Tiene una altitud promedio de 2 952 msnm en un rango entre 226 y 5 452 msnm; cuenta con una superficie de 65 300 km² entre las coordenadas 100.72° a 98.45° longitud oeste y 18.31° a 20.34° latitud norte (INEGI, 2020). Para comprensión de la metodología, el análisis se concentra en seis sitios (Figura 1), que representan diferentes zonas de precipitación anual cercanas a cuerpos de agua (lagos, lagunas y presas), y son importantes zonas de recarga de los diferentes acuíferos. La importancia de tales sitios radica en que la información y disponibilidad hídrica anual son recursos utilizados para gestión del agua en la región.

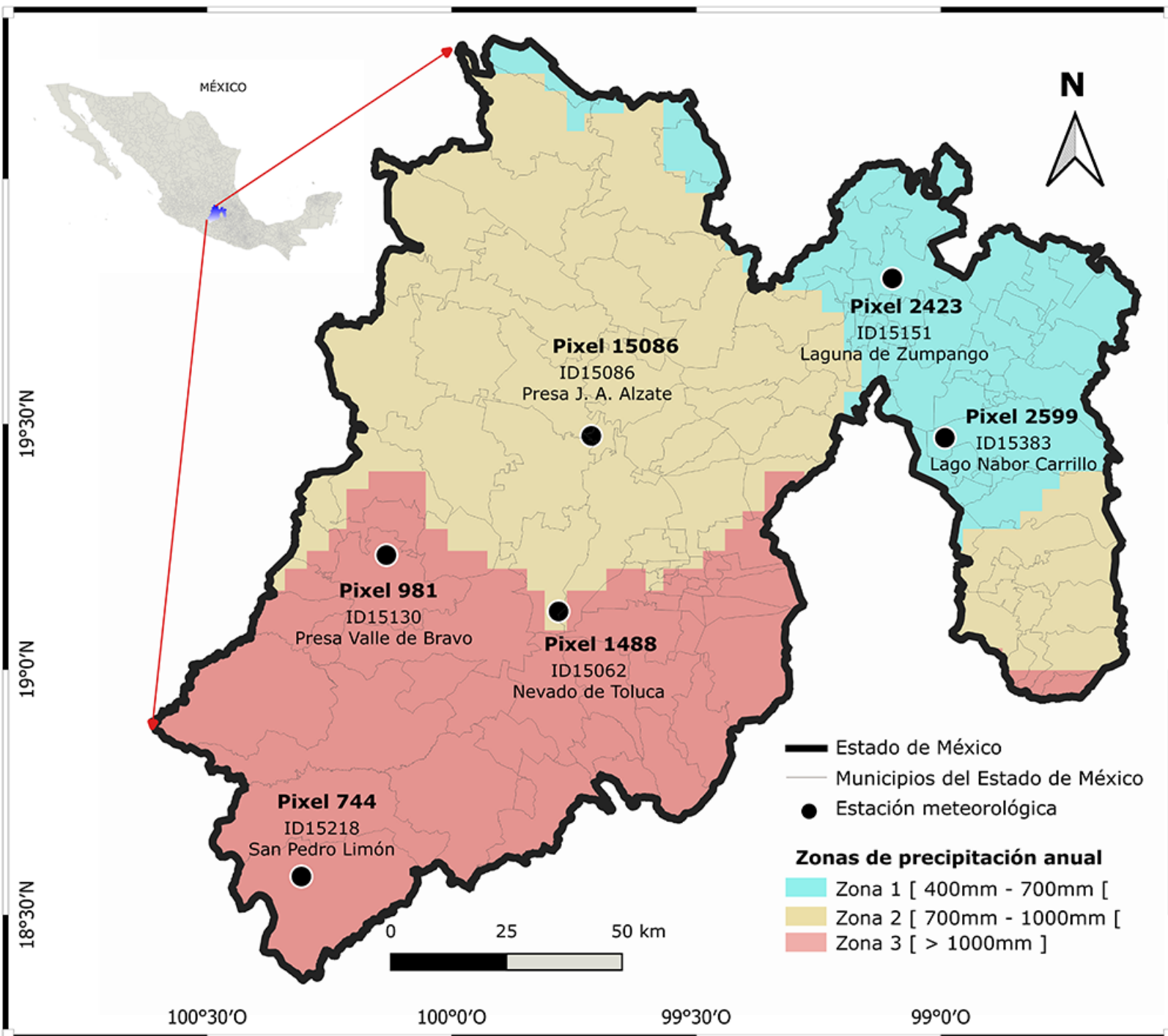


Figura 1. Estaciones meteorológicas y agrupación de zonas por su régimen pluviométrico anual de la región del Altiplano Central de México.

Datos meteorológicos

Se consideraron 746 estaciones climatológicas con datos diarios de precipitación (P), temperatura máxima ($T_{\max}$) y temperatura mínima ($T_{\min}$) para el periodo 1960-2009, a fin de conformar la base de datos inicial o semilla. La selección de este periodo es porque contiene el mayor número de estaciones con información coincidente en la zona de estudio. La información se extrajo de la base de datos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2012). Por la variabilidad climática que presenta la región del altiplano central de México, se dividió en tres zonas de acuerdo con su régimen pluviométrico anual: a) zona 1, con precipitaciones menores a 700 mm; b) zona 2, con precipitaciones entre 700 y 1 000 mm, y c) zona 3 con precipitaciones mayores a 1 000 mm (Figura 1).

Procesamiento de datos meteorológicos

Interpolación diaria

Los datos diarios puntuales de las variables P , $T_{\max}$ y $T_{\min}$ de las 746 estaciones meteorológicas se interpolaron para expresar la información en formato matricial con 62 columnas y 56 renglones (3 742 píxeles con área de 18.81 km² cada píxel). Esto puede verse ahora como 3 742 sitios con información de las variables consideradas. Para cada variable meteorológica se obtuvieron 18 250 mapas interpolados de manera diaria. Los parámetros de las variables de los días 29 de febrero de cada año bisiesto se acumularon al 28 de febrero para obtener una serie homogénea de 50 años con 365 días, tal como lo sugieren Byun y Wilhite

(1999). Una vez generados los mapas de las variables meteorológicas, se calculó la evapotranspiración potencial diaria (ETP) por medio del método de Thorntwaite (Da Silva, Silva, Póvoas, & Ramos, 2023) y con el empleo de los mapas interpolados de P , $T_{\max}$ y $T_{\min}$ del periodo de análisis.

Parámetros estadísticos

A partir de las imágenes diarias de precipitación y temperaturas se calcularon los dos primeros momentos estadísticos μ_1 (media) y μ'_2 (varianza) de cada una de las variables. Además, se obtuvieron las imágenes del comportamiento promedio diario de cada variable meteorológica. Este régimen espacial de comportamiento se obtuvo como el promedio de los valores de los 50 años de cada día juliano del año. Con este proceso se obtuvieron 365 imágenes del promedio diario del comportamiento para cada variable utilizada.

Método

En la Figura 2 se muestra de forma estructurada el proceso metodológico utilizado para tres casos de análisis. El caso I fue para obtener la sensibilidad de índices de sequía del periodo original de 50 años (1960-2009 con mapas diarios de P y ETP). El caso II y caso III correspondieron al análisis de la sensibilidad de índices de sequía con series sintéticas de 1 000 años generadas para las variables P , $T_{\max}$ y $T_{\min}$, con características de una función de distribución normal (FDN) y otra con la función de distribución gamma (FDG), respectivamente.

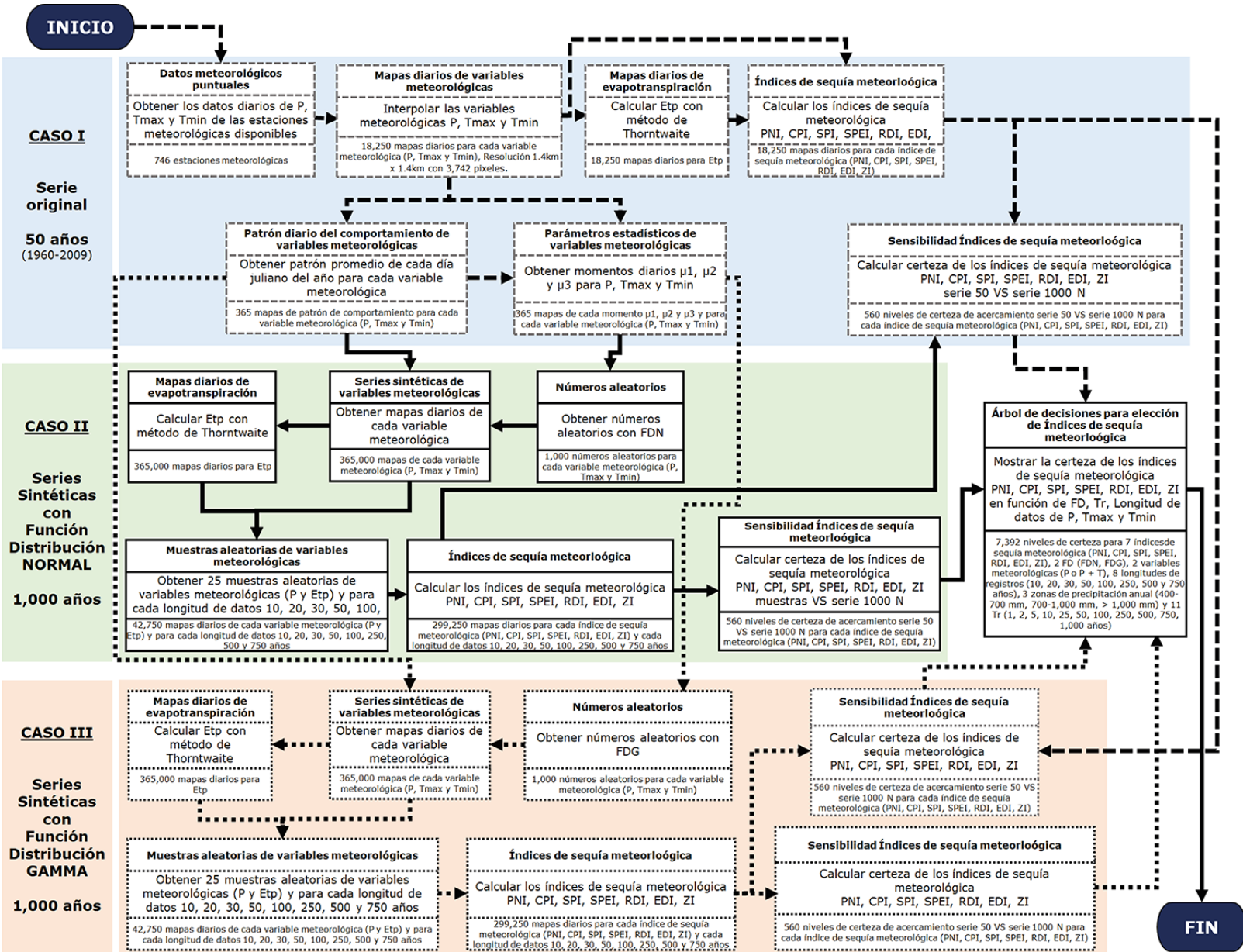


Figura 2. Diagrama general de flujo de la estructuración del proceso metodológico.

Caso I

Corresponde al periodo original de 50 años (1960-2009) con los mapas diarios interpolados de las variables P , $T_{\max}$ y $T_{\min}$, así como de los calculados para la ETP. Una vez obtenidos los mapas diarios, se suman los mapas correspondientes para obtener los mapas mensuales. De acuerdo con las variables requeridas para cada índice, se calcula la magnitud de la sequía mensual para cada uno de los índices de sequía considerados en este trabajo.

Índices de sequía meteorológica

Los índices de sequía que se tomaron en cuenta para el análisis de sensibilidad fueron los siguientes: porcentaje de precipitación normal (PNI) (Gibbs & Maher, 1967; Escalante & Reyes, 2005); cuantiles de precipitación (CPI) (Escalante & Reyes, 2005); índice Z -score (ZI) (Sirdaş & Şen, 2003); índice estandarizado de precipitación (SPI) (McKee *et al.*, 1993); índice de precipitación efectiva (EDI) (Byun & Wilhite, 1999); índice de reconocimiento de sequías (RDI) (Tsakiris & Vangelis, 2005), y el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2012). En la Tabla 1 se muestran los indicadores utilizados para analizar su sensibilidad de acuerdo con la longitud de registros de la serie meteorológica requerida (precipitación y temperatura).

Tabla 1. Características de los índices de sequía utilizados. Modificada de OMM (2016).

Nombre del índice	Sigla	Variables de entrada	Facilidad de uso (OMM, 2016)	Referencia
Cuantiles de precipitación	CPI	P		Gibbs y Maher (1967)
Precipitación efectiva	EDI	P		Byun y Wilhite (1999)
Precipitación normal	PNI	P		Bhalme y Mooley (1980)
Reconocimiento de sequías	RDI	P, T_{max}, T_{min}		Tsakiris y Vangelis (2005)
Precipitación-evapotranspiración estandarizado	SPEI	P, T_{max}, T_{min}		Vicente-Serrano, Berguería y López-Moreno (2010)
Estandarizado de precipitación	SPI	P		McKee <i>et al.</i> (1993)
Z -score	ZI	P		Sirdaş y Şen (2003)

P = precipitación

T_{max} = temperatura máxima

T_{min} = temperatura mínima

De acuerdo con la OMM, el código de color es por la facilidad de uso del índice, donde el verde es de fácil uso y el amarillo es medianamente fácil de usar.

Caso II y caso III

El análisis fue realizado con las series sintéticas de mil años, generadas para los mapas diarios de las variables P , T_{max} y T_{min} , y con características de una FDN y otra con FDG. Cabe resaltar que las series

sintéticas fueron generadas a partir de las características estadísticas de las muestras de 50 años de las 746 estaciones climatológicas consideradas.

Series sintéticas

Los estudios hidrológicos —y en particular el análisis de sequías— están fundamentados principalmente en el comportamiento de variables como precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudales, entre otras. Estas variables, debido a su naturaleza, pueden ser calificadas como variables aleatorias, por lo que se consideran impredecibles de forma determinística (Linsley, Kholer, & Paulhus, 1988; Chow, Maidment, & Mays, 1994). A menudo los registros históricos de tales variables son cortos para análisis de frecuencias (< 50 años), donde lo deseable es utilizar series de datos más largas. Una forma de incrementar el número de datos de cada variable puede ser la generación sintética de estos y considerarlos como observaciones probables de la variable. Dichos datos sintéticos tienen las mismas propiedades estadísticas del registro histórico y, sobre todo, son igualmente probables de ocurrir en el futuro. Las series sintéticas generadas no constituyen físicamente nuevos datos hidrológicos, sino que hacen mejor uso de la información estadística contenida en el registro histórico, por lo que estos valores contienen las mismas características descriptivas del fenómeno, pero están sujetos a los mismos errores de muestreo de los datos de origen (Campos-Aranda, 2007).

La generación de una secuencia aleatoria de una variable continua, con distribución de probabilidad definida, es llevada a cabo haciendo uso de la relación que existe entre la función de distribución de probabilidad

de la variable y de la distribución uniforme. Se asume que la función de probabilidad se distribuye de modo uniforme en el intervalo $(0, 1)$ (Campos-Aranda, 2007).

La técnica general para simulación de variables aleatorias continuas, a través de la función inversa de transformación, es la siguiente: sea U una variable aleatoria uniforme en el intervalo $(0, 1)$, para toda función F de distribución continua, se define la variable aleatoria continua como $X = UF^{-1}$. Entonces, la variable aleatoria X toma la forma de la función de distribución F . UF^{-1} se define igual al valor X para el cual $F(x) = U$, entonces $F_X(a) = P\{X \leq a\} = P\{UF^{-1} \leq a\}$. $F(X)$ es una función monótona $UF^{-1} \leq a$ si y solo si $U \leq F(a)$. Se supone una variable aleatoria X de distribución continua F cuando F^{-1} es calculada para simular un número aleatorio U con ajuste $X = UF^{-1}$ (Ross, 1985).

El análisis probabilístico de la información climatológica se hizo bajo la hipótesis de que la variable a modelar proviene de una función de distribución de probabilidades normal o gamma. Estas funciones han sido ampliamente utilizadas para análisis del comportamiento de precipitación diaria, mensual y anual (Campos-Aranda, 2007; Linsley *et al.*, 1988; Escalante & Reyes, 2005). La función normal ha sido recomendada para análisis de precipitación con valores mensuales de zonas húmedas y la función gamma para valores diarios en zonas secas (Linsley *et al.*, 1988). En este trabajo se asumieron estas recomendaciones de FDN y FDG como hipótesis de modelación probabilística para la generación sintética de datos diarios de precipitación, y temperaturas máximas y mínimas.

Generación de series sintéticas

En este análisis, se denominó como “serie histórica” a los datos diarios observados durante 50 años (1969-2009) de las 746 estaciones meteorológicas. Asimismo, se llamó “serie semilla” a los 365 000 datos diarios sintéticos generados para la serie de 1 000 años. Se generó la serie semilla de mil años para cada variable meteorológica por medio de las FDN y FDG. Los parámetros estadísticos de la FDN y FDG se estimaron a partir de la serie histórica. Para la serie semilla de P con la FDN, los valores negativos que resultaron de la generación sintética de datos se consideraron como precipitaciones nulas con base en la naturaleza del fenómeno, lo que dio lugar a una función normal truncada (Yevjevich, 1972). Para generar las series semillas de cada variable meteorológica se propuso el siguiente proceso:

1. Obtener mil números aleatorios de la FDN para cada día juliano.
2. Multiplicar los números aleatorios FDN por cada mapa del patrón de comportamiento diario de cada variable meteorológica, obtenidos en la sección interpolación diaria. Este proceso se realiza para los 365 días julianos del año, por lo que se generaron 365 000 imágenes diarias de cada variable meteorológica.
3. Obtener la ETP con las series semillas de T_{max} y T_{min} (en este trabajo se calculó por medio del método de Thornthwaite).
4. Obtener las series mensuales de mil años para la variable P y ETP (sumando los días correspondientes de cada mes).

5. Extraer aleatoriamente 25 muestras mensuales de P y ETP para cada una de las diferentes longitudes de datos: 10, 20, 30, 50, 100, 250, 500 y 750 años.
6. Repetir los pasos del 1 al 6 para generar series sintéticas de mil años para FDG.

Niveles de certeza de los índices

El nivel de certeza de cada índice de sequía meteorológica se evaluó como el grado de acercamiento de las 25 series aleatorias de cada longitud de registro ("series de longitudes diferentes"), contrastado con los resultados de índices de la serie sintética de mil años ("series de resultados verdaderos"). Entonces, el nivel de certeza fue calculado como la medida de acercamiento que cada serie de longitudes diferentes tuvo con respecto a las series de resultados verdaderos de cada índice de sequía meteorológica (Figura 3).

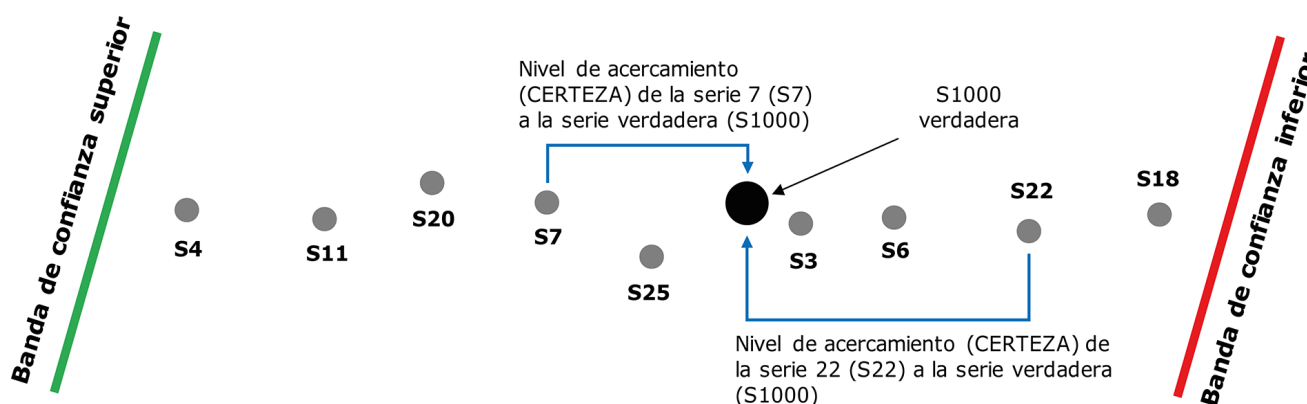


Figura 3. Niveles de certeza entre serie verdadera (mil años) y las 25 series aleatorias de cierta longitud de registro.

Las líneas en color verde y rojo conforman las bandas de confianza inferior y superior, respectivamente. Los círculos grises representan los resultados de cada una de las 25 series aleatorias, simbolizadas desde S1 hasta S25. El círculo central negro representa el resultado de la serie sintética de mil años.

Para obtener el nivel de certeza, primero se obtuvieron los cuantiles para diferentes periodos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 750 años (correspondientes a las probabilidades 0.50, 0.80, 0.90, 0.96, 0.98, 0.99, 0.996, 0.998 y 0.999, respectivamente). Después se graficaron, para cada cuantil, los resultados de las 25 muestras aleatorias de cada periodo de retorno. Estos valores crean bandas de posibles resultados para cada cuantil o bandas de confianza (Figura 3). Finalmente, el nivel de certeza de cada índice se calculó como el error porcentual entre cada cuantil de cada periodo de retorno y el cuantil de la serie sintética de mil años.

Sensibilidad de los índices

Se propuso una categoría de sensibilidad de índices de sequía a partir de los resultados de la certeza de su estimación con base en la longitud del periodo de datos; las categorías fueron excelente, bueno, regular y malo. Para obtener dichas categorías se ordenaron los resultados de errores de estimación de cada índice de acuerdo con el tamaño de la muestra, periodo de retorno y zona de precipitación homogénea. Luego se ordenaron estos datos de menor a mayor. Después se obtuvieron los valores correspondientes al 10, 30 y 50% de esos datos de errores de estimación ordenados, denominados VE10, VE30 y VE50, respectivamente. Para la categoría de “excelente” se agruparon todos los

valores menores a VE10; para la categoría “bueno” se consideraron aquellos resultados con error entre VE10 y VE30; para la categoría de “regular”, errores entre VE30 y VE50; para la categoría de sensibilidad “malo” se tomaron los valores correspondientes a los errores mayores a VE50. Este proceso fue replicado para cada una de las bandas de confianza tanto para la inferior como superior (mínima y máxima). Finalmente, la sensibilidad de los índices se integra como el rango de errores de estimación, que fueron calculados por los respectivos valores de las bandas de confianza.

Construcción del árbol de decisiones

Como apoyo a los usuarios, se propuso un árbol de decisiones para orientarlos sobre el uso de algunos de los índices de sequía meteorológica más conocidos. La sugerencia de elección del índice estará en función de los siguientes criterios de selección:

- I. Variables meteorológicas de las que se disponga: solo precipitación, o bien, precipitación y temperaturas.
- II. Rango de longitud de los registros de las variables meteorológicas disponibles: 10-20; 20-30; 30-50; 50-100; 100-250; 250-500; 500-700 años.
- III. Rango de precipitación anual de la zona de estudio (entre 400-700 mm, 700-1 000 mm, o bien mayor de 1 000 mm).

Además de los criterios anteriores, el usuario también deberá seleccionar el nivel de error que desea admitirse en los cálculos del fenómeno para seleccionar el índice de sequía más adecuado. El árbol de decisiones se proporciona tanto para FDN como para FDG.

Resultados

Se presentan, a manera de ejemplo, la Figura 4 (a-l) que expresa el comportamiento de la sensibilidad del índice EDI para 10 y 750 años de longitud de datos tanto para FDN como FDG. En la Figura 4 se aprecia que para cualquier régimen de precipitación los errores del índice aumentan si la longitud de registros disminuye. Es decir, para tamaños de muestras de 10 años, el ancho de las bandas de confianza es mayor que para muestras de 750 años. Esto significa que para longitudes cortas de datos existe una gran variación en los resultados de acercamiento a la serie de mil años. Sucede lo opuesto con los resultados de muestras de mayor longitud, pues los niveles de acercamiento a la serie de mil años fueron muy cercanos a ésta, con lo que se generaron ancho de las bandas de confianza más estrechos. Este comportamiento de sensibilidad ante el tamaño de la longitud de datos fue el mismo para todos los índices analizados.

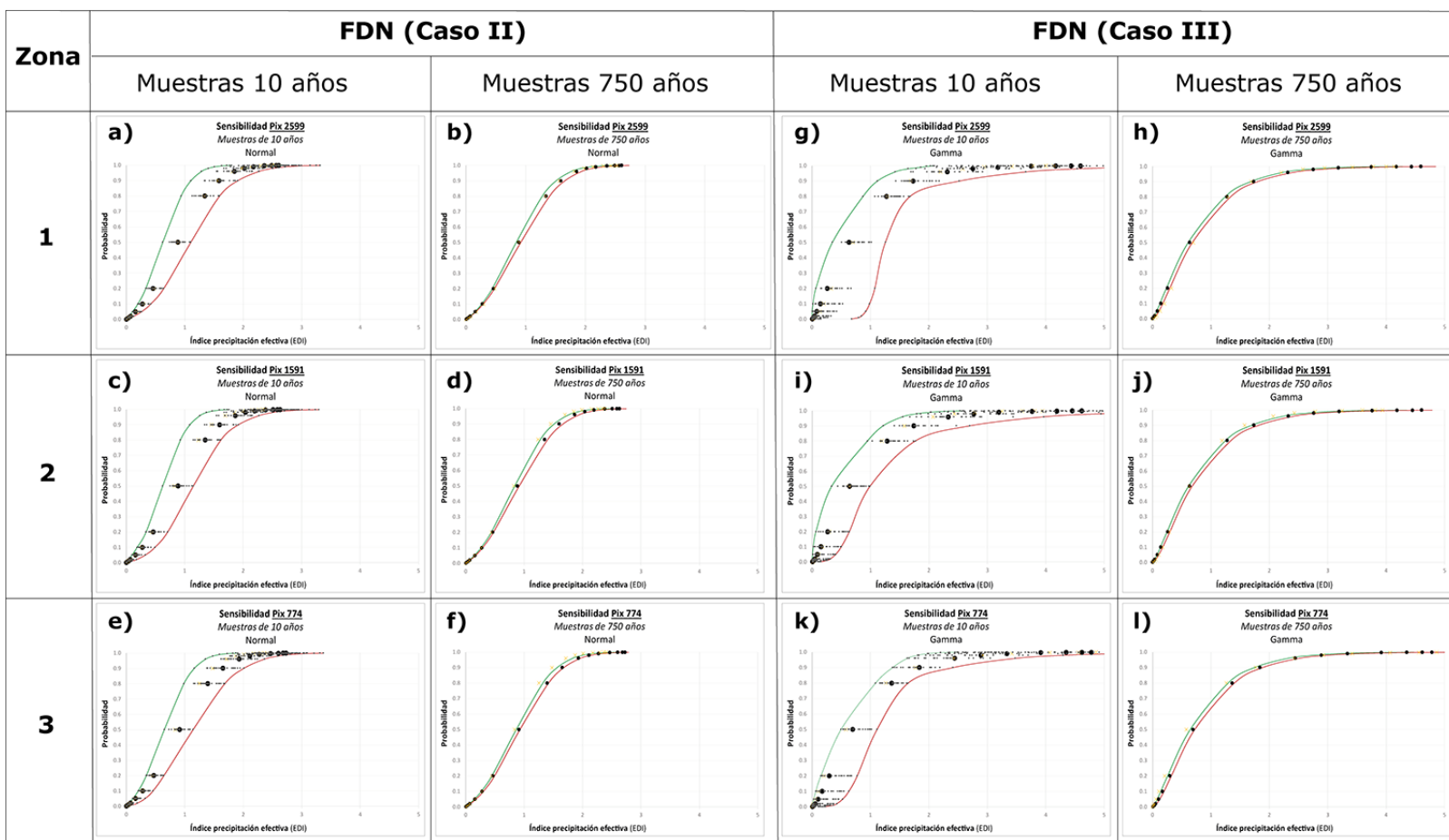


Figura 4. Ejemplo de sensibilidad del índice EDI para 10 y 750 años de longitud de registro con FDN (4a-4f) y FDG (4g-4l).

En la Figura 5 se observa la sensibilidad de los siete índices de sequía con FDN y FDG, expresada como el error de cada índice para cada longitud de registros. La Figura 5 (a-g) muestra el comportamiento de sensibilidad de índices de sequía para FDN (caso II) y la Figura 5 (h-n) para FDG (caso III). De manera global, los resultados con FDN tienen menores valores de error que FDG. Entonces, se asume que utilizar FDG aporta más sensibilidad a los índices de sequía que FDN. De manera particular, el índice CPI no muestra sensibilidad significativa ante cambio

de longitud de datos tanto para FDN como FDG. Otro índice que mostró poca sensibilidad ante la longitud de datos fue PNI para FDN y FDG, siempre y cuando se usen a partir de 20 años de longitud de datos. Los índices EDI y SPEI pierden sensibilidad a partir de 50 años de longitud de registros para FDG; pero si se usa SPEI con FDN, este no es sensible a longitudes de datos. En cambio, el índice RDI es muy sensible para registros menores de 30 años para FDN, pero se alarga este comportamiento para FDG hasta los 250 años. El índice ZI pierde sensibilidad cuando es mayor a 100 años de longitud de registro para FDN y FDG. Sin embargo, el índice SPI no es sensible ante la longitud de datos después de 10 años para FDN, pero es más sensible con la FDG.

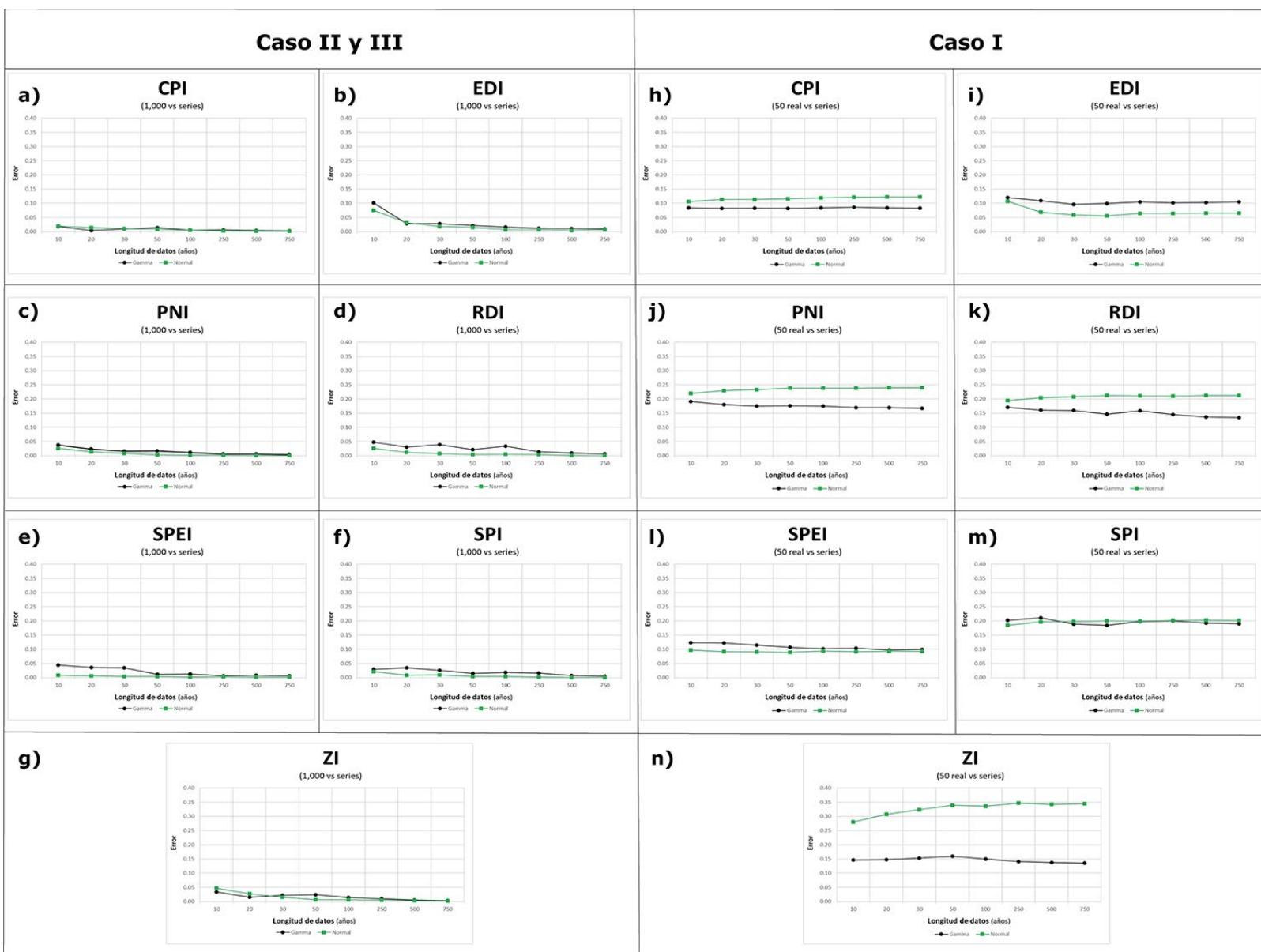


Figura 5. Error de los índices de sequía meteorológica para datos generados con FDN y FDG.

Lo mostrado en la Figura 5 (a-g) corresponde al método de comparación de serie sintética de mil años con series de diferente tamaño de muestra y las gráficas (h-n) de la Figura 5 corresponden al método de

comparación de serie original de 50 años con series de diferente tamaño de muestra.

También se presentan tanto la Tabla 2 como la Tabla 3 como soporte para la toma de decisiones en la elección del mejor índice de sequía de acuerdo con cierta longitud de registros disponibles y con cierto régimen pluviométrico de la zona analizada. En dichas tablas se muestra la categoría de sensibilidad de los siete índices de sequía meteorológica analizados en este trabajo tanto para datos generados con FDN como para FDG. Igualmente, en estas tablas se tienen las categorías de la sensibilidad de los estimadores de sequía en código de colores para una mejor selección. El color azul es para la categoría “Excelente”; el verde, para “Buena”; el amarillo, para “Regular”, y el rojo para la categoría “Mala”.

Tabla 2. Categorías de sensibilidad de índices de sequía meteorológica de acuerdo con FDN, zona de precipitación, longitud de registro y periodo de retorno.

Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras																										
ÍNDICE	Tr	Zona 1								Zona 2								Zona 3								
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	
CPI	1	0.11	0.05	0.06	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	5	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	10	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	25	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	
	50	0.05	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
	100	0.05	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
	250	0.05	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
	500	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
	750	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
1000	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00		
EDI	1	0.20	0.15	0.12	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.40	0.08	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.45	0.12	0.05	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	
	2	0.08	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	
	5	0.08	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	
	10	0.08	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	
	25	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.09	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	
	50	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	
	100	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	
	250	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	
	500	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	
	750	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	
1000	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01		

Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras																										
ÍNDICE	Tr	Zona 1								Zona 2								Zona 3								
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	
PNI	1	0.07	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	10	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	25	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	50	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	100	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	250	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	500	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	750	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
1000	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			
RDI	1	0.11	0.03	0.01	0.05	0.04	0.03	0.01	0.00	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	
	2	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	10	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00		
	25	0.04	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	50	0.05	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	100	0.05	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	250	0.06	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	500	0.06	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	750	0.06	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
1000	0.06	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			
SPEI	1	0.03	0.06	0.07	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.08	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.08	0.03	0.04	0.09	0.03	0.03	0.01	0.03	
	2	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	100	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	250	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	500	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	750	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
1000	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
SPI	1	0.09	0.05	0.04	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	
	2	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	10	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	25	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	50	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	100	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	250	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	500	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	750	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
1000	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			
ZI	1	0.46	0.16	0.09	0.07	0.03	0.01	0.01	0.00	0.32	0.23	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02	0.01	0.24	0.09	0.07	0.03	0.04	0.01	0.02	0.01	
	2	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
	5	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	
	10	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	
	25	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	
	50	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	
	100	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
	250	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
	500	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
	750	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
1000	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07																	

Tabla 3. Categorías de sensibilidad de índices de sequía meteorológica de acuerdo con FDG, zona de precipitación, longitud de registro y periodo de retorno.

Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras																											
ÍNDICE	Tr	Zona 1								Zona 2								Zona 3									
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)									
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750		
CPI	1	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.06	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.06	0.01	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01		
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	10	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	25	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	50	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
	100	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
	250	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
	500	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
	750	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
	1000	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
EDI	1	0.50	0.41	0.09	0.31	0.50	0.36	0.27	0.32	0.50	0.50	0.50	0.50	0.36	0.19	0.18	0.12	0.50	0.50	0.50	0.54	0.31	0.06	0.03	0.08		
	2	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01		
	5	0.08	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00		
	10	0.10	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.08	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00		
	25	0.12	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10	0.04	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00		
	50	0.12	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.11	0.05	0.03	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00		
	100	0.13	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.12	0.05	0.04	0.05	0.02	0.01	0.02	0.01	0.10	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00		
	250	0.13	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.13	0.05	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.11	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00		
	500	0.14	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.13	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.11	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00		
	750	0.14	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.14	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.12	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00		
	1000	0.14	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.14	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.12	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00		
PNI	1	0.11	0.07	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00	0.06	0.04	0.04	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.15	0.09	0.04	0.07	0.01	0.01	0.02	0.01		
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
	10	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00		
	25	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00		
	50	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.06	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01		
	100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.07	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01		
	250	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.08	0.04	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01		
	500	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01		
	750	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01		
	1000	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01		

Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras

ÍNDICE	Tr	Zona 1								Zona 2								Zona 3							
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)							
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750
RDI	1	0.44	0.44	0.34	0.16	0.22	0.12	0.05	0.02	0.36	0.28	0.26	0.18	0.18	0.05	0.03	0.01	0.10	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
	2	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	10	0.04	0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
	25	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.02	0.01	0.00	0.07	0.05	0.05	0.03	0.04	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	50	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.03	0.01	0.01	0.08	0.05	0.06	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	100	0.05	0.05	0.06	0.02	0.06	0.03	0.02	0.01	0.09	0.05	0.07	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
	250	0.06	0.05	0.06	0.02	0.06	0.03	0.02	0.01	0.09	0.06	0.07	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	500	0.06	0.06	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.01	0.10	0.06	0.08	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
	750	0.06	0.06	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.01	0.10	0.06	0.08	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
	1000	0.06	0.06	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.01	0.10	0.06	0.08	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
SPEI	1	0.42	0.32	0.13	0.09	0.05	0.02	0.03	0.03	0.32	0.13	0.15	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.08	0.09	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
	2	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
	10	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	25	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.05	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
	50	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.06	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
	100	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00
	250	0.08	0.06	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07	0.06	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00
	500	0.08	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.08	0.07	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00
	750	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.08	0.07	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00
	1000	0.09	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.09	0.07	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00
SPI	1	0.19	0.25	0.08	0.09	0.10	0.08	0.02	0.01	0.19	0.18	0.14	0.07	0.08	0.08	0.03	0.02	0.08	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	2	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	10	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
	25	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.05	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	50	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	100	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
	250	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.07	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	500	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.08	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	750	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.08	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	1000	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.08	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
ZI	1	0.59	0.26	0.33	0.08	0.06	0.06	0.04	0.04	0.55	0.24	0.23	0.18	0.07	0.05	0.04	0.02	0.37	0.28	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
	5	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00
	10	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00

Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras																											
ÍNDICE	Tr	Zona 1								Zona 2								Zona 3									
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)									
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750		
	25	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00		
	50	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00		
	100	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00		
	250	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00		
	500	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00		
	750	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00		
	1000	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00		

Para el caso II, con datos de FDN (Tabla 2), se observa de manera general que la mayoría de los estimadores de sequía podría usarse con longitudes de registro mayores a 10 años y $Tr > 2$ años. Una notable excepción fue el índice SPEI, que mostró bajos niveles de errores de estimación desde longitudes de datos de 10 años y para cualquier Tr . Es importante señalar que para $Tr < 2$ años, los índices CPI, EDI y ZI tienen errores significativos de estimación, por lo que deberían usarse con cautela. Para el caso III, con datos FDG (Tabla 3), todos los errores de los índices analizados sugieren el uso de los mismos con $Tr > 2$ años, con excepción de CPI y SPI que tuvieron errores muy bajos. De manera particular, los índices CPI, PNI, SPI y ZI podrían usarse con seguridad a partir de 10 años de longitudes de datos. Se recomienda el uso de los índices EDI y SPEI a partir de series de 20 años de longitud. Cabe resaltar que para casos prácticos, los valores de sequía con $Tr < 2$ años también representarían los valores para periodos de estiaje. Los valores mostrados en ambas figuras (Tabla 2 y Tabla 3) corresponden a los errores estándar para cada índice, donde el color azul es para categoría "Excelente", el verde es para "Buena", el color amarillo es para la categoría "Regular" y el rojo para "Malo".

Por último, en la Figura 6 se muestra el árbol de decisiones como apoyo para seleccionar el índice de sequía meteorológica más idóneo en alguna zona de estudio. La selección estará en función de las variables de entrada, longitud de registros disponibles de las variables de entrada y régimen pluviométrico anual de la zona. La Figura 6a es útil cuando se asume que las variables meteorológicas siguen una FDN y la Figura 6b para una FDG. Para el uso de los árboles de decisión de la Figura 6, también debe asumirse el valor de error de estimación de los índices para el cálculo de sequía meteorológica en caso de que se muestren más de dos opciones de estimadores. Asimismo, en ambas figuras se considera que los rangos de los valores de error están de acuerdo con el promedio de los errores estándar de estimación para Tr desde 1.0 hasta mil años. De manera general, se observa que EDI reduce los errores de estimación a partir de 20 años de longitud de registro tanto para FDN como para FDG.

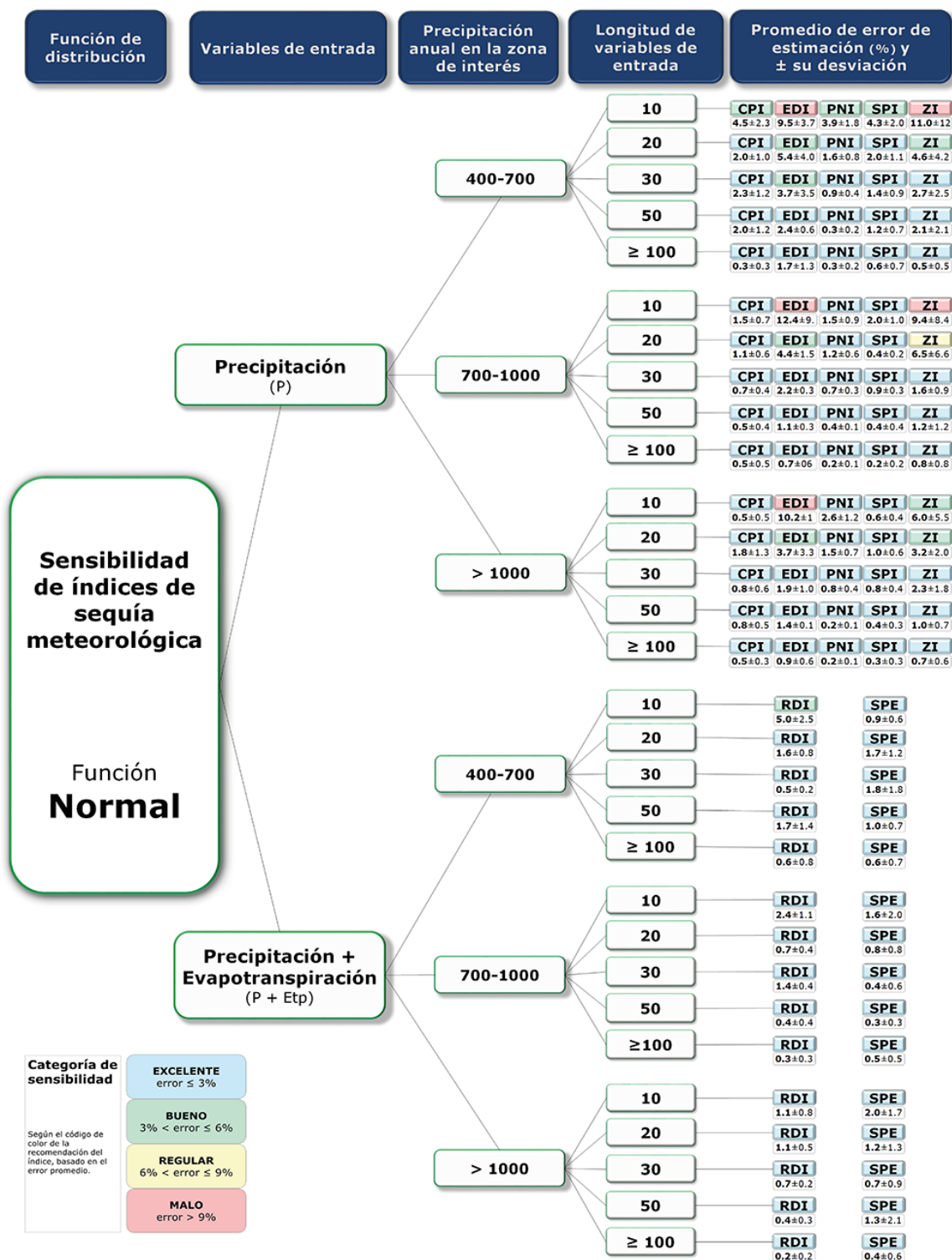


Figura 6a. Árbol de decisiones para seleccionar el índice de sequía meteorológica con FDN.

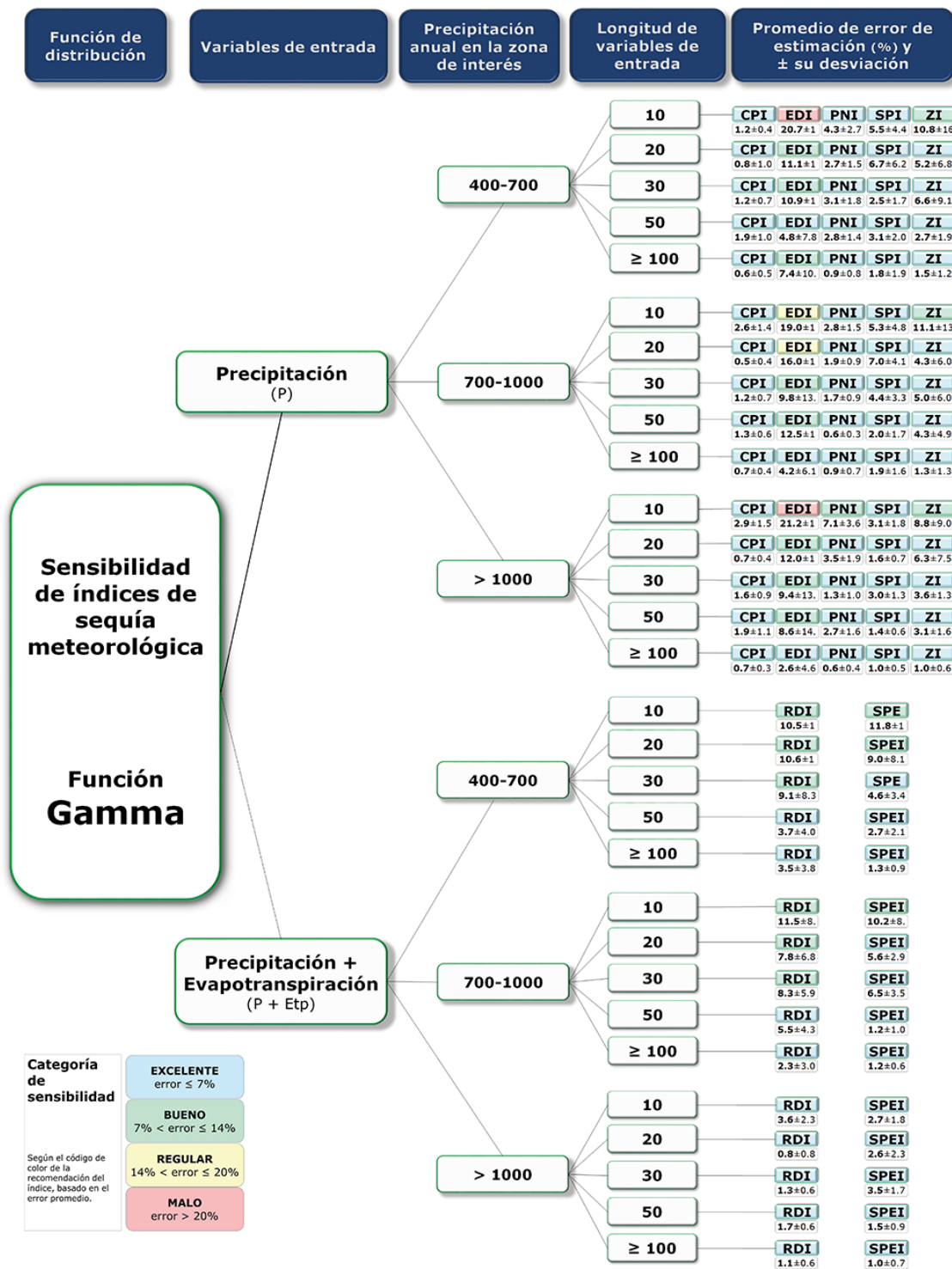


Figura 6b. Árbol de decisiones para seleccionar el índice de sequía meteorológica con FDG.

Prueba de normalidad de la serie original de precipitación de 50 años

Se realizó una prueba de normalidad a la serie original de 50 años de precipitación diaria. La prueba se ejecutó con el método de Shapiro-Wilks, con la hipótesis principal a probar H_0 : la serie de precipitación sigue una función de distribución normal ($p\text{-value} \geq 0.05$), y con hipótesis alterna H_1 : la serie de precipitación no sigue una función de distribución normal ($p\text{-value} < 0.05$). Debido a que la serie de precipitación se usó como semilla para generar las series sintéticas FDN y FDG, el análisis de normalidad se realizó para cada día juliano de la serie diaria de precipitación de 50 años. Entonces, las series de cada día juliano estuvieron conformadas por 50 datos. En la Figura 7a se muestran los resultados de la prueba de normalidad, es decir, los sitios donde los días julianos en los que H_0 fue aceptada. Los resultados mostraron que solamente en 1 284 pixeles del mapa (37 %), algunas series de datos julianos de la precipitación original siguen una FDN y como máximo se contabilizaron seis series de datos julianos. En la Figura 7b se observa el histograma de los valores del coeficiente de correlación (W) de la prueba de Shapiro-Wilks, calculado para todos los pixeles de la zona de estudio y para todas las 365 series de datos julianos de precipitación. En esta figura se observa que para el valor mínimo de corte (para aceptar que los datos tienen una buena correlación con series normales), con $n = 50$ y $\alpha = 0.05$, el valor mínimo es $W = 0.947$. Por lo que, prácticamente, los datos de las series no cumplen la prueba de normalidad. Por último, en la Figura 7c se observan las series de días julianos que cumplen con la prueba de normalidad, donde a partir del día 160 y hasta el 270 se cumple

en promedio con 60 pixeles de cada mapa (menos del 2 % de los sitios de análisis). Como conclusión de esta prueba realizada a la serie original, las series para cada día juliano no sigue una FDN, pues en general, los datos siguen una FDG. Asimismo, los pocos sitios donde se cumplió esta prueba de normalidad correspondieron a días con precipitación significativa, es decir, solo se cumple la prueba de normalidad para la época de lluvias en la región de estudio.

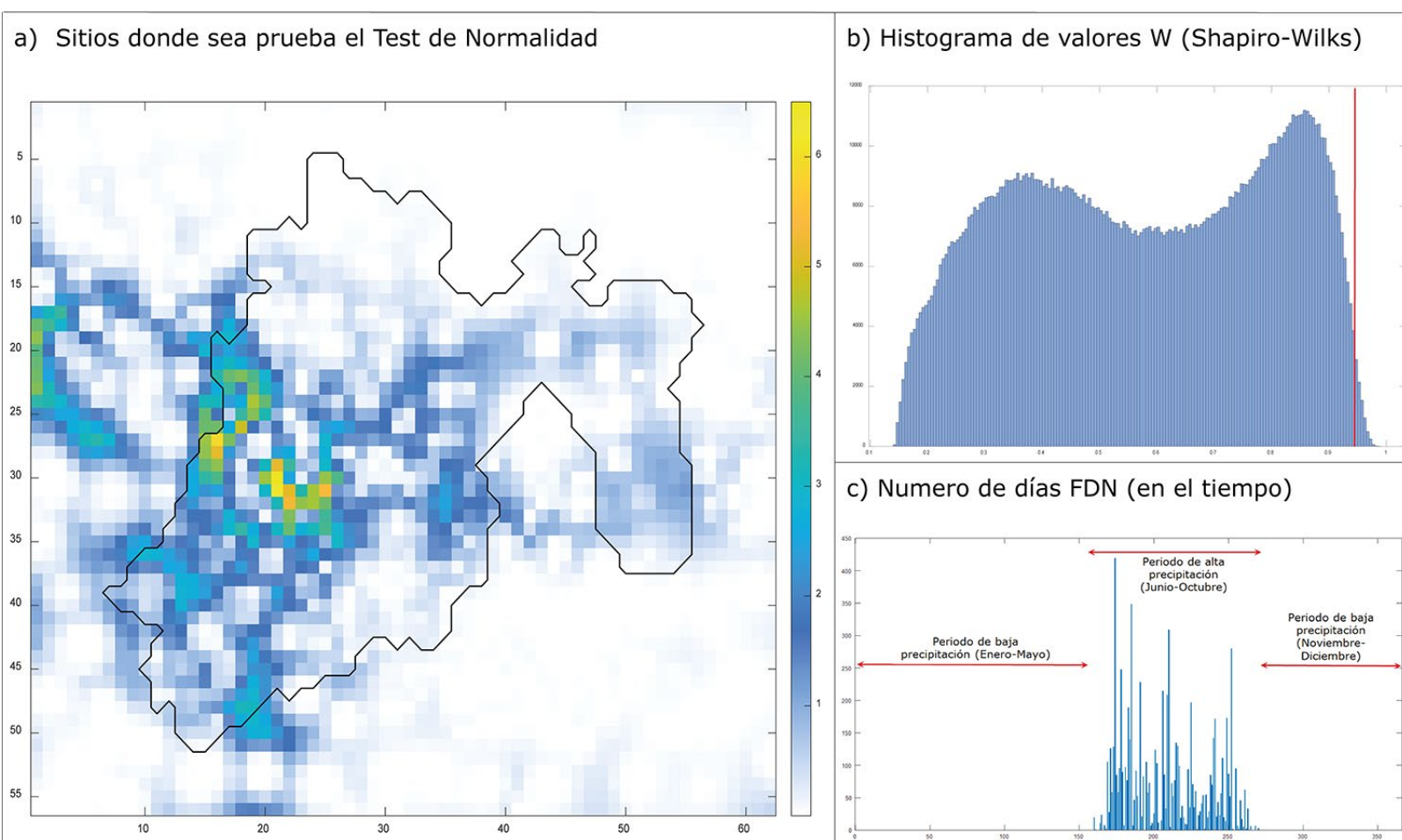


Figura 7. Prueba de normalidad de la serie original de 50 años.

Los resultados del análisis de sensibilidad para la serie original de precipitación de 50 años (caso I) se muestran en la Figura 8. En esta gráfica se presentan los siete índices analizados para los seis sitios de las presas, lagos y lagunas de interés. En los seis sitios de análisis, la prueba de normalidad solo fue aprobada entre los meses de mayo a octubre (que corresponde con el periodo de precipitación). En general, todos los índices mostraron menos del 10 % de error respecto a la serie sintética de mil años con FDN. En cambio, cuando la serie sintética se generó con datos de FDG, los errores aumentaron en la localidad de San Pedro Limón hasta el 20 % para los índices ZI y SPEI, así como hasta 16 % para RDI. De igual manera, con datos de FDG para la serie sintética, en todos los sitios se observó un aumento entre el 10 y 15 % para los índices PNI, EDI y SPI. Por otro lado, los índices que menos error presentaron en la mayoría de los sitios analizados fueron EDI y SPEI con FDN, así como CPI, EDI, SPI y SPEI para FDG. Ordenando de menor a mayor los resultados de errores de estimación de los índices, EDI fue el mejor para los sitios de interés, seguido de SPEI, ZI y SPI.

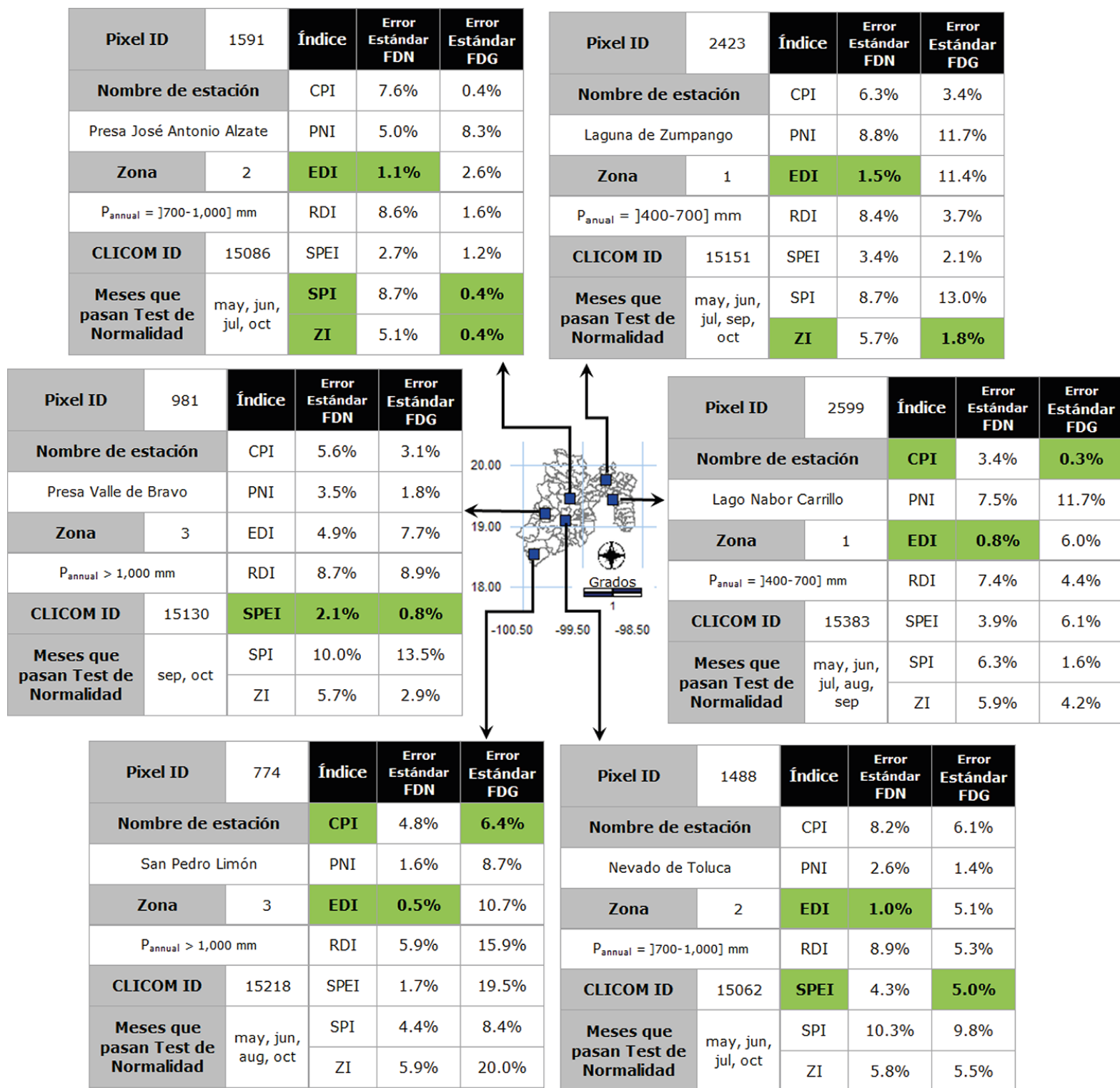


Figura 8. Resultados Caso I: error estándar (%) de índices de sequía meteorológica para la serie original 50 años.

Los datos resaltados en color verde son los mejores índices para FDN y FDG en cada sitio (con el menor error estándar).

Discusión

Como se esperaba, las longitudes mayores de datos se aproximaron más al comportamiento de la serie de mil años, independientemente de la función de distribución, tal como se mostró en la Figura 4 para el índice EDI. Esto mismo fue encontrado en el trabajo de Mahmoudi *et al.* (2019), donde EDI tuvo mejores resultados a nivel mensual al aumentar la longitud de los datos. El índice SPI con FDG mostró una alta sensibilidad para longitudes de datos de 10 y 20 años, a diferencia de las otras longitudes de registro. Esto coincide con los resultados de diversos autores, como Keyantash y Dracup (2002), y Mahmoudi *et al.* (2019), quienes encontraron en sus estudios que el SPI es un buen índice de sequía solo con longitudes de registro mayores de 20 años.

Por otro lado, en el presente caso de estudio se detectó que los índices PNI y CPI no son sensibles a cálculos con diferente longitud de registro, lo mismo que Penalba y Rivera (2015) concluyeron en su estudio de 2015. De igual forma, este trabajo mostró que los índices RDI y SPEI perdieron sensibilidad a partir de 20 años de tamaño de muestra. Con base en los hallazgos de diferentes trabajos presentados por Stagge, Tallaksen, Gudmundsson, Van Loon y Stahl (2015); Peña-Gallardo, Gámiz-Fortis, Castro-Díez y Esteban-Parra (2016); Castillo-Castillo, Ibáñez-Castillo, Valdés, Arteaga-Ramírez y Vázquez-Peña (2017), y Vicente-Serrano *et al.* (2012), los resultados de este estudio coinciden con que SPEI es uno de los mejores índices de sequía para longitudes de

registro mayores a 20 años. Los resultados de este trabajo concuerdan con Link *et al.* (2020), quienes destacan que para una buena estimación de la sequía, mientras más largas sean las series de datos climatológicos de entrada, los errores de estimación de los índices serán menores.

Además, para la estimación de la sequía con SPI, Stagge *et al.* (2015) llegaron a la conclusión de que la FDG ofrece mejores estimaciones que las obtenidas con una FDN. Sin embargo, en este trabajo sucedió lo contrario. Una posible causa puede ser que las condiciones pluviométricas y geográficas fueron diferentes en ambos estudios. No obstante, la diferencia de errores entre ambas funciones FDN y FDG puede considerarse no significativa, ya que fueron de orden del 5 a 10 %.

Cabe resaltar que ninguno de los estudios previos ha proporcionado un árbol de decisiones como apoyo a los usuarios que realicen análisis de sequía meteorológica. Esta herramienta podrá orientar sobre la selección del índice en función del error de estimación, longitud de las variables de entrada y precipitación anual en la zona de estudio, por lo que estos resultados se consideran de gran utilidad para la comunidad científica y operativa en relación con el análisis probabilístico del fenómeno de la sequía en una cuenca o región.

Conclusiones

De acuerdo con el proceso metodológico propuesto para cuantificar la sensibilidad de siete índices de sequía meteorológica, se concluye que los índices CPI, PNI, RDI, SPI y SPEI son poco sensibles al tamaño de longitud de registros de datos de entrada. De manera específica, CPI, PNI, RDI y SPI dejan de ser sensibles con longitudes de registro desde 20 años, y SPEI a partir de 10 años. Por otra parte, los índices EDI y ZI son muy

sensibles a longitudes menores de datos para su estimación, pues se requieren de periodos de registro mayores a 30 y 20 años, respectivamente, para tener buenos niveles de certeza. Asimismo, el error de los índices fue menor cuando se usó una FDN para generación de series sintéticas diarias de P , T_{max} y T_{min} . De igual forma, si se usan más variables meteorológicas en la estimación de sequías, los errores en promedio disminuyen entre un 13 y 40 % más, que si se usa solamente P . También, entre más P anual exista en la zona de estudio, los errores de estimación de sequía disminuyen entre un 6 y 10 % con los índices analizados. En lo que se refiere a las variables iniciales (precipitación y temperaturas), se recomienda hacer previamente análisis de normalidad a los datos diarios antes de generar series sintéticas, y utilizar de forma adecuada una FDN o FDG de acuerdo con el comportamiento de los datos. Se encontró que las series con datos diferentes de cero siguen más una FDN y cuando predominen datos con cero, lo preferible es usar una FDG.

Dado que hasta ahora no se ha identificado ningún estudio previo que ofrezca un árbol de decisiones como herramienta de respaldo para selección de índices de sequía meteorológica, se considera que este trabajo sería de gran utilidad para la comunidad científica y operativa sobre análisis probabilístico de sequías. Sin embargo, la utilización del árbol de decisiones estará condicionada por las variables de entrada y longitud de las mismas, así como por la magnitud de la precipitación anual de la zona de estudio.

Con base en los hallazgos del presente trabajo, se encontraron aspectos para mejorar los procesos: 1) usar otros métodos para cálculo de evapotranspiración, como el de Penman-Monteith sugerido por la FAO o el método de Hargreaves-Samani debido a que el método de Thornthwaite es considerado un estimador limitado de la realidad

evaporativa; 2) utilizar funciones de distribución conjunta para modelar probabilísticamente la ocurrencia simultánea de componentes de la sequía para establecer relaciones con los índices de sequía; 3) replicar esta metodología para regímenes pluviométricos más secos o más húmedos para ampliar el nivel de certidumbre de los índices de sequía; 4) en caso de que la nueva extensión temporal de la información lo permita y se verifique la identificación de la condición de no estacionariedad, esta última deberá considerarse como un posible efecto del cambio climático. Por lo tanto, las series semilla de las variables de temperatura y precipitación deberán depurarse antes del proceso de generación de series sintéticas.

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por otorgar la beca de doctorado para realización de estudios de posgrado en el IITCA-UAEMex.

Referencias

- Aburrea, J., & Cebrián, A. (2002). Distribución de la sequía más severa en un intervalo de tiempo dado. En: *El agua y el clima* (pp. 125-134). España: Publicaciones de la Sociedad Española de Climatología. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9123>
- Arrojo, A. (2008). Prevenir las sequías desde la planificación en perspectivas de cambio climático. *Revista Ambienta*, (78), 34-40.
- Bayazit, M., & Önöz, B. (2005). Probabilities and return periods of multisite droughts. *Hidrological Sciences-Journal-Des Sciences Hydrologiques*, 50(4), 605-615. DOI: 10.1623/hysj.2005.50.4.605

- Bayissa, Y. A., Moges, S. A., Xuan, Y., Van Andel, S. J., Maskey, S., Solomatine, D. P., Van Griensven, A., & Tadesse, T. (2015). Spatio-temporal assessment of meteorological drought under the influence of varying record length: The case of Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 60(11), 1927-1942. DOI: 10.1080/02626667.2015.1032291
- Bhalme, H. N., & Mooley, D. A. (1980). Large-scale drought/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108, 1179-1211. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<1197:LSDAMC>2.0.CO;2
- Birkel, D. C. (2006). Sequía hidrológica en Costa Rica ¿Se han vuelto más severas y frecuentes en los últimos años? *Revista Reflexiones*, 85(1-2), 107-116.
- Bordi, I., & Sutera, A. (2002). An analysis of drought in Italy in the last fifty years. *Società Italiana Di Fisica. Il Nuovo Cimento*, 25, 185-206.
- Byun, H., & Wilhite, D. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2
- Campos-Aranda, D. F. (2007). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. San Luis Potosí, México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B., & Rossi, G. (2005). *Stochastic forecasting of standardized precipitation index*. XXXI IAHR Congress (pp. 3252-3260), Seoul, Korea.

- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 35-52. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-01-03
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Applied hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Inc.
- Crespo, P. G. (2006). *Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biósfera mexicana*. Montecillo, México: Colegio de Posgraduados.
- Da Silva, B. L. G., Silva, B. C. P., Póvoas, C. E., & Ramos, A. (2023). Estimativa da evapotranspiração de referência por três métodos, para a região de Ilhéus/BA. *Research, Society and Development*, 12(4), e7812440936. DOI: 10.33448/rsd-v12i4.40936
- Escalante, S., & Reyes, C. L. (2005). *Análisis de sequías. Volumen I y volumen II*. Ciudad de México, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fernández, H. W., & Buscemi, N. H. (2000). Análisis y caracterización de sequías hidrológicas en el Centro Oeste de Argentina. *Proceedings of the XVIII Congreso Nacional del Agua (Conagua)*. Santiago del Estero, Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, Termas de Río Hondo.
- Fernández-Larrañaga, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería del Agua*, 4(4), 37-46. DOI:10.4995/ia.1997.2734
- Gibbs, W. J., & Maher, J. V. (1967). Rainfall deciles as drought indicators. In: *Bureau of Meteorology Bulletin* 48. Melbourne, Australia: Bureau of Meteorology.

- González, P. J. (2005). *Caracterización estocástica de la realización espacio-temporal de eventos hidrológicos extremos de sequías* (tesis de grado). Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Hallack-Alegria, M., & Watkins, D. J. (2006). Annual and warm season drought intensity-duration-frequency: Analysis of Sonora, México. *Journal of Climate*, 20(9), 1-44. DOI: 10.1175/JCLI4101.1
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *INEGI*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/>
- Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *American Meteorological Society*, 83(8), 1167-1180. DOI: 10.1175/1520-0477-83.8.1167
- Link, R., Wild, T. B., Snyder, A. C., Hejazi, M. I., & Vernon, C. R. (2020). 100 years of data is not enough to establish reliable drought thresholds. *Journal of Hydrology X*, 7, 100052. DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100052
- Linsley, R., Kholer, M., & Paulhus, J. L. H. (1988). *Hidrología para ingenieros* (2a ed.). Cali, Colombia: McGraw-Hill.
- Mahmoudi, P., Rigi, A., & Kamak, M. M. (2019). Evaluating the sensitivity of precipitation-based drought indices to different lengths of record. *Journal of Hydrology*, 579, 124181. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124181
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, January 17-22, Anaheim, California, USA.

- Moneo, M. (2008). *Drought and climate change impacts on water resources: Management alternatives* (tesis doctoral). Valencia, España: Universidad Politécnica de Madrid. DOI: 10.20868/UPM.thesis.1222
- Nadarajah, S., & Gupta, A. K. (2006). Distribución Gamma bivariada de Cherian como un modelo para datos de sequía. *Revista Agrociencia*, 40(4), 483-490.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2016). Programa de gestión integrada de sequías. Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. En: Svoboda, M., & Fuchs, B. A. (eds.), *Manual de indicadores e índices de sequía*. Ginebra, Suiza: OMM. Recuperado de https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016.pdf
- Peña-Gallardo, M., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2016). Análisis comparativo de índices de sequía en Andalucía para el periodo 1901-2012. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 67-88. DOI: 10.18172/cig.2946
- Penalba, O. C., & Rivera, J. A. (2015). Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. *Centro Argentino de Meteorólogos*, 40(2), 33-57.
- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2004). *La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo*. Recuperado de http://www.undp.org/content/undp/es/home/librarypage/crisis-prevention-and-recovery/reduction_risques_catastrophes.html

- Ross, S. M. (1985). *Introduction to probability models* (3rd ed.). Cambridge, USA: Academic Press.
- Sirdaş, S., & Şen, Z. (2003). Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 48(5), 809-820. DOI: 10.1623/hysj.48.5.809.51458
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2012). *Normales climatológicas por estación*. Recuperado de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35, 4027-4040. DOI: 10.1002/joc.4267
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11.
- Vicente-Serrano, S., Berguería, S., & López-Moreno, J. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1
- Vicente-Serrano, S., Berguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J., López-Moreno, J., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27. DOI: 10.1175/2012EI000434.1

- Wu, H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Svoboda, M. D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Clitatology*, 25, 505-520. DOI: 10.1002/joc.1142
- Yahiaoui, A., Tauaîba, B., & Bouvier, C. (2009). Frequency analysis of the hydrological drought regime. Case of oued Mina catchment in western of Algeria. *Revue Nature et Technologie*, 1, 13-15.
- Yevjevich, V. M. (1972). *Probability and statistics in hydrology* (pp. 126-133). Fort Collins, USA: Water Resources Publications.