

Tendencias de la precipitación y su relación con el Índice Oceánico El Niño. El caso de la Región Mixteca, México

Precipitation trends and their relationship with El Niño Oceanic Index. The case of the Mixteca Region, Mexico

Martínez-Austria, P. F.^a, Díaz-Jiménez D.^b

^aUniversidad de las Américas Puebla. Director de la Cátedra UNESCO-UDLAP en Riesgos Hidrometeorológicos. Escuela de Ingeniería. Ex Hacienda Sta. Catarina Mártir, s/n. San Andrés Cholula. 72810, México. E-mail: polioptro.martinez@uldap.mx

^bUniversidad de las Américas Puebla. Escuela de Ingeniería. Ex Hacienda Sta. Catarina Mártir, s/n. San Andrés Cholula. 72810, México. E-mail: david.diazjs@udlap.mx

Recibido: 19/06/2017

Aceptado: 08/01/2018

Publicado: 31/01/2018

Citar como: Martínez-Austria, P. F., Díaz-Jiménez D. 2018. Precipitation trends and their relationship with El Niño Oceanic Index. The case of the Mixteca Region, Mexico. *Ingeniería del agua*, 22(1), 1-14. <https://doi.org/10.4995/la.2018.7779>

RESUMEN

La ocurrencia de sequías es una preocupación constante en zonas áridas y semiáridas, especialmente cuando se trata de regiones socialmente vulnerables como es el caso de la Región Mixteca en México, condición que puede agravarse según se anticipa de los escenarios de cambio climático. Los modelos de circulación general no permiten prever las condiciones de precipitación en escalas regionales, por lo que se hace necesario el estudio de las tendencias y comportamientos climáticos locales. Determinar la relación entre el clima local y fenómenos de gran escala, como los eventos El Niño/La Niña, es de relevancia para establecer medidas de prevención. En este artículo se analiza la tendencia de la precipitación en la región Mixteca de México, se determina la presencia de una tendencia estadísticamente significativa a la disminución en la precipitación, y se analiza la relación entre las condiciones de precipitación en la zona y el Índice Oceánico El Niño. Se muestra que existe una tendencia estadísticamente significativa de disminución de la precipitación, y se encuentra que existe una correlación entre el índice Oceánico El Niño y las condiciones de precipitación extrema –humedad o sequía- en la región.

Palabras clave | Tendencias de precipitación; precipitación y cambio climático; sequías; Índice Estandarizado de Sequías; Índice Oceánico El Niño; Región Mixteca.

ABSTRACT

The occurrence of droughts is a permanent concern in arid and semi-arid zones, especially for socially vulnerable ones such as the Mixteca Region in Mexico, a condition that can be aggravated as climate change scenarios predicts. The general circulation models do not allow forecasting precipitation conditions at regional scales, so it is necessary to study local climate behavior and trends. Determining the relationship between local climate and large-scale phenomena, such as El Niño / La Niña events, is relevant to set up prevention measures. This article analyzes the precipitation trends in the Mixteca Region of Mexico, determines the presence of a statistically significant trend in observed decrease in precipitation, and analyzes the relationship between precipitation conditions in the zone and the Ocean Niño Index. It is shown that there is a statistically significant trend of decreasing precipitation, and it is found that there is a correlation between the El Niño Oceanic Index and the conditions of extreme precipitation -humidity or drought- in the region.

Key words | Precipitation trends; Precipitation and climate change; Droughts; Standardized Precipitation Index; Oceanic El Niño Index; Mixteca Region.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones relativas a los efectos del cambio climático, en particular en regiones semiáridas y áridas, es la disminución prevista de la precipitación promedio y la ocurrencia de sequías más frecuentes e intensas debidas al cambio climático (IPCC, 2013). Esta preocupación es mayor aún en las zonas más vulnerables, como aquellas en las que existen condiciones de pobreza. Tal es el caso de la región en estudio en este texto. Estimar, a partir de observaciones, si en efecto está ocurriendo una disminución en la precipitación, así como correlacionar la precipitación con algún indicador climático, sería de gran utilidad para disminuir la vulnerabilidad y diseñar acciones de adaptación al cambio climático.

Las sequías son uno de los desastres naturales que mayores daños causan a los seres humanos, tanto porque son motivo de mortalidad como por los graves daños económicos y sociales que ocasionan. Por otra parte, el número de desastres relacionados con el clima extremo ha venido aumentando en el mundo. Goklany (2009) elaboró un estudio del número promedio anual de eventos extremos relacionados con el clima registrados por década, en el periodo 1900-2008. Encontró un crecimiento muy notable a partir de mediados del siglo pasado. Así mientras en la década de 1950-1959 se registraron 23 desastres, en la primera década de este siglo XXI, hasta el año 2008, ocurrieron 354 desastres relacionados con extremos climáticos. Para que un evento se registre en la base de datos como un desastre, al menos se deben cubrir uno o más de los siguientes criterios a) al menos se reportaron 10 personas muertas, b) al menos 100 personas se reportaron como afectadas, c) se declaró estado de emergencia o d) ocurrió una solicitud de asistencia internacional (Goklany, 2009). De acuerdo con Hoeppe (2016), el número de eventos que ocasionaron pérdidas humanas o materiales creció de alrededor de 300 en 1980, a cerca de 900 en el año 2014. Como resultado del cambio climático se espera que continúe aumentando el número de desastres relacionados con el clima, entre ellos las sequías.

En la Tabla 1 se muestran los diez desastres naturales relacionados con el clima que ocasionaron mayores pérdidas humanas en el periodo 1970-2012. Como puede apreciarse, cuatro de éstos fueron sequías, mismas que produjeron 650 000 decesos en ese periodo.

Tabla 1 | (a) Desastres con mayor número de decesos, registrados en el periodo 1970-2012 (World Meteorological Organization, 2014) y (b) Población en porcentaje debajo de la línea de pobreza, (1.9 dólares/día o menos, Nation Master, 2017).

Rango	Tipo de desastre	Año	País	Número de muertes	Población debajo de línea de pobreza (%)
1	Sequía	1983	Etiopía	300 000	29.6
2	Tormenta	1970	Bangladesh	300 000	31.5
3	Sequía	1984	Sudán	150 000	46.5
4	Tormenta	1991	Bangladesh	138 866	31.5
5	Tormenta	2008	Myanmar	138 366	32.7
6	Sequía	1975	Etiopía	100 000	29.6
7	Sequía	1983	Mozambique	100 000	54.7
8	Temperatura extrema	2010	Federación Rusa	55 736	13.1
9	Inundación	1999	Venezuela	30 000	31.6
10	Inundación	1974	Bangladesh	28 700	31.5

(a)

(b)

Por otra parte, está bien documentado que uno de los efectos esperados del cambio climático será la disminución en la precipitación y la ocurrencia de fenómenos extremos en latitudes medias (IPCC, 2013). De acuerdo al Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés): “Un clima cambiante produce cambios en la frecuencia, la extensión espacial, la duración y las circunstancias temporales de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y puede dar lugar a fenómenos meteorológicos extremos sin precedentes (IPCC 2012)”. En lo que respecta a la precipitación, el IPCC estima que el cambio no será uniforme. La región en estudio se ubica en latitudes medias, en las que se espera una disminución de la precipitación (IPCC, 2014). Asimismo, estudios nacionales indican que la precipitación en la región Mixteca disminuiría en 12% en el escenario RCP6.0 (Salinas Prieto *et al.*, 2015).

Las estimaciones citadas de precipitación futuras están basadas en los resultados de modelos de circulación general. Al respecto, el IPCC ha estimado el desempeño de estos modelos, haciendo una comparación de sus resultados con el clima observado durante el período 1980-1999. En relación con la temperatura, cuando se analizan los resultados de varios modelos (el promedio de 23 modelos de circulación general), el error de estimación, es decir, la diferencia entre lo observado y el modelo, raramente supera los 2°C, aunque los modelos individuales pueden mostrar errores cercanos a 3°C (Randall y Word, 2007). Sin embargo, el IPCC advierte que “las características de mayor escala del clima se simulan con mayor precisión que las características regionales y de menor escala”. Por consiguiente, el análisis regional del impacto y la vulnerabilidad del cambio climático debe basarse sólidamente en pruebas observacionales. Como resultado, los más recientes informes de evaluación del IPCC (IPCC, 2007; IPCC, 2014) no se sustentan únicamente o predominantemente en los resultados de los modelos de circulación general, sino también en las evidencias observacionales. Sin embargo, en este último informe también se señala que “existe una falta de equilibrio geográfico en los datos y en la literatura sobre los cambios observados, con marcada escasez en los países de ingresos bajos y medios”. Los estudios regionales de la variación observada son fundamentales para corroborar el desempeño de los modelos globales y, sobre todo, para la adopción de medidas de adaptación; y son especialmente necesarios en países como México.

En el caso del clima de una región especialmente afectada por los océanos, como es México, es importante establecer la posible correlación entre la precipitación y eventos oceánicos de gran escala, como el fenómeno de El Niño/La Niña. En este texto se analiza esta ocurrencia a través del Índice Oceánico el Niño (ONI, por sus siglas en inglés) y empleando como indicador de la precipitación el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), como se detalla en la sección de métodos más adelante.

En México, las sequías han sido un fenómeno que históricamente ha causado grandes daños (i.e. Florescano, 2000). Mediante análisis de anillos de árboles centenarios, con análisis de sedimentos y con datos directos, diversos investigadores han documentado sequías extremas en periodos de alrededor de 50 y 100 años, que coinciden con registros históricos de hambruna o grandes convulsiones sociales. Así ocurrió en las mega sequías de 1438-1460, registrada por los aztecas; la de 1517-1538, que coincide con la conquista de México; la de 1714-1723, registrada como un periodo de hambre en el país; la de 1866-1876 y, ya en este siglo, la de 1968-1986 (Cerano Paredes *et al.*, 2011; Peterson y Haug, 2005; Ortega Gaucin, 2013).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México, en la región donde se ubica la zona de estudio, son de esperar disminuciones en la precipitación de entre 10% y 20% para el periodo 2075-2099, en los escenarios RCP 6 y RCP 8.5, respectivamente, como se puede observar en la Figura 1 (INECC, 2016).

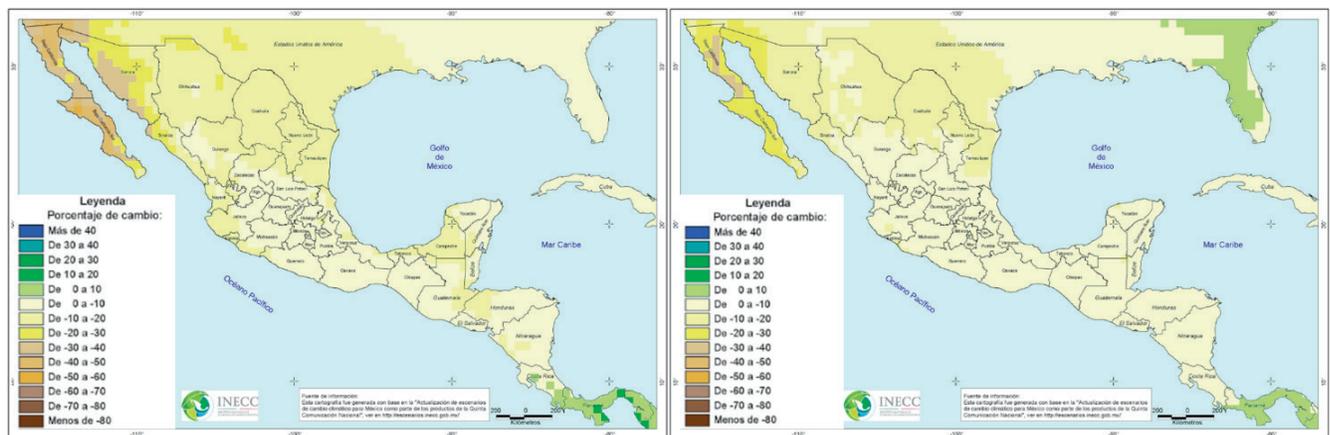


Figura 1 | Cambios esperados en la precipitación, en porcentaje, para el periodo 2075-2099, según los escenarios RCP6 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) con respecto a la precipitación histórica 1961-2000 (INECC, 2016).

Las sequías tienen un origen multifactorial, lo que ha dificultado enormemente la construcción de un método universal para su pronóstico. La investigación al respecto está centrada actualmente en métodos probabilísticos y en el empleo de redes neuronales, aún sin resultados concluyentes (i.e. Tian *et al.*, 2016; Otkin *et al.*, 2015; Maca y Pech, 2016). Ante estas dificultades, y la necesidad

práctica de gestionar las sequías, un enfoque operativo es el monitoreo y análisis histórico de sequías, que realizan diversas organizaciones, gobiernos e investigadores; empleando diversos índices, entre ellos de manera generalizada el Índice Estandarizado de Sequías (SPI, por sus siglas en inglés). El objetivo de este estudio ha sido caracterizar las tendencias de precipitación en la región Mixteca, y analizar su correlación con indicadores climáticos de gran escala, en particular el fenómeno de El Niño/La Niña.

MÉTODOS

La definición conceptual de la sequía como una “deficiencia de precipitaciones durante un periodo de tiempo relativamente prolongado”, si bien es de sencillo entendimiento, no es una definición operacional, es decir una que permita caracterizar a la sequía en su severidad, efectos, inicio y término. Con este propósito se emplean índices de precipitación.

De entre los diversos índices de precipitación, uno de los más empleados es el Índice Estandarizado de Sequía, que se ha recomendado como un estándar internacional, para realizar análisis comparativos entre diversas regiones. En el año 2009, en la ciudad de Lincoln, bajo los auspicios del National Drought Mitigation Center de la Universidad de Nebraska, se llevó a cabo un taller internacional para analizar los índices para la sequía en uso por los centros meteorológicos mundiales y en investigación (ver Hayes *et al.*, 2011). Se llegó a un consenso entre los integrantes del taller para hacer uso de un solo índice y así poder generar una base de datos mundial. Se acordó emplear el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI por sus siglas en inglés), por la disponibilidad de datos, por su facilidad de interpretación, así como por su capacidad de cálculo en intervalos cortos o muy prolongados de tiempo. Otra ventaja del SPI es que permite observar no sólo los periodos anormalmente secos, sino también los extremadamente húmedos, y la variabilidad entre ellos.

El Índice Estandarizado de Precipitación representa el número de desviaciones estándar en que el valor transformado de la precipitación se desvía del promedio histórico, que por lo tanto representa el valor cero (ver Marcos Valiente, 2001). Para calcular el SPI se considera una distribución gamma para el histograma de precipitación. La función de densidad de probabilidades se transforma (mediante una transformación equiprobable) en la de una distribución normal. El índice de Precipitación Estandarizado se calcula entonces como la diferencia entre la precipitación estacional estandarizada respecto de la media, entre la desviación estándar.

$$SPI = \left(\frac{X_{ij} - X_{im}}{\sigma} \right) \quad (1)$$

Donde X_{ij} es la precipitación estacional en la i -ésima estación y en la j -ésima observación; X_{im} es la media estacional y σ la desviación estándar.

Tabla 2 | Valores y categorías del Índice Estandarizado de Sequías (Lloyd-Hughes y Saunders, 2002).

Valor del SPI	Categoría	Probabilidad (%)
2.00 o mayor	Extremadamente húmedo	2.3
1.5 a 1.99	Severamente húmedo	4.4
1 a 1.49	Moderadamente húmedo	9.2
0 a 0.99	Ligeramente húmedo	34.1
0 a -0.99	Ligeramente seco	34.1
-1 a -1.49	Sequía moderada	9.2
-1.5 a -1.99	Sequía severa	4.4
-2 o menor	Sequía extrema	2.3

Conforme al valor registrado del SPI se puede caracterizar la condición de humedad, como se muestra en la Tabla 2, desde extremadamente húmedo ($SPI \geq 2$) hasta sequía extrema ($SPI \leq -2$), así como la probabilidad de ocurrencia.

En México, el Servicio Meteorológico Nacional emplea una clasificación más detallada, como se muestra en la Tabla 3. Esta clasificación, dados los rangos en que usualmente varía el SPI, es de mayor utilidad, pues permite una mejor descripción de las condiciones de humedad prevalecientes en sitio, y apoya la toma de decisiones operativas.

Tabla 3 | Valores y categorías del Índice Estandarizado de Sequías empleados en México (CONAGUA, 2017).

Valor del SPI	Condición
≥ 2.0	Excepcionalmente húmedo
1.60 a 1.99	Extremadamente húmedo
1.30 a 1.59	Muy húmedo
0.80 a 1.29	Moderadamente húmedo
0.51 a 0.79	Ligeramente húmedo
-0.5 a 0.50	Cercano a lo normal
-0.79 a -0.51	Ligeramente seco
-1.29 a -0.80	Moderadamente seco
-1.59 a -1.30	Muy seco
-1.99 a -1.6	Extremadamente seco
≤ -2.0	Excepcionalmente seco

El SPI puede calcularse en diferentes periodos, los más empleados son de 1, 3, 9 y 12 meses. Cada uno de estos valores tendrá un significado físico diferente. Los valores de SPI a 1 y 3 meses reflejan la condición de precipitación en periodos cortos y pueden emplearse para identificar el inicio de la sequía, o bien para determinar efectos de importancia en periodos cortos del déficit, por ejemplo durante la época de siembra o floración de los cultivos. Debe tenerse cuidado con la interpretación de estos parámetros en las regiones donde la escasez de lluvias es normal durante la estación seca. El SPI de seis meses es significativo para identificar las variaciones de precipitación entre estaciones. Si ocurre un valor bajo del SPI durante la estación de lluvias, se puede identificar como un periodo de sequía que tendrá impactos importantes en la sociedad.

El SPI de 9 meses da una indicación de pautas de precipitación en escalas temporales medias. Las sequías normalmente tardan una estación o más en desarrollarse. Los valores de SPI debajo de -1.5 se consideran un buen indicativo de que la sequía está teniendo un impacto importante en la agricultura y puede estar afectando a otros sectores. En la escala temporal del SPI de 12 a 24 meses se reflejan patrones de precipitación a largo plazo y permiten identificar con claridad periodos de sequía intensa.

Una vez realizado el cálculo de la variación histórica del SPI, en caso de observarse una tendencia de cambio en la precipitación, es importante probar que ésta es estadísticamente significativa. Con este propósito se empleará la prueba de tendencia Rho de Spearman, que ha sido ampliamente usada en el análisis de series de variables hidrometeorológicas (i.e. Yue *et al.*, 2003; Ahmad *et al.*, 2015, Martínez-Austria y Bandala, 2017, Calahorrano *et al.*, 2017). En esta prueba se calcula el estadístico:

$$Z_{SR} = D \sqrt{\frac{n-2}{1-D^2}} \quad (2)$$

Donde n es el número total de datos en la serie, y el valor de D se calcula con la ecuación:

$$D = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_i - i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3)$$

Donde R_i es el rango de la i -ésima observación.

La hipótesis nula es que no existe una tendencia en la serie. Si $|Z_{SR}| > t_{(n-2, 1-\alpha/2)}$ entonces se rechaza la hipótesis nula y existe una tendencia en la serie. En esta ecuación, $t_{(n-2, 1-\alpha/2)}$ es el valor del estadístico t de la distribución t de Student para un nivel α de significancia.

Por otra parte, las sequías tienen origen multifactorial, es decir que su ocurrencia, intensidad y duración no se puede asociar a un solo evento climático. No obstante, se ha estudiado la correlación entre eventos extremos—sequías o precipitaciones intensas—

con algunos índices climáticos oceánicos, en especial con El Niño, debido a sus efectos de alcance global. Así, se ha podido establecer la correlación de El Niño con algunos eventos de sequías en América, y en particular en México y Centroamérica (ver IICA, 2016).

La FAO ha identificado la ocurrencia de sequías ligadas a los eventos El Niño en diferentes países en el periodo 1986-2010; sin embargo el patrón encontrado no es consistente, dado que las áreas afectadas no fueron exactamente las mismas en los diferentes eventos de El Niño. En el caso de México, se registraron sequías en determinadas regiones, en algunos eventos El Niño, pero no en todos (Rojas *et al.*, 2014). Por otra parte, el método de determinación de la condición de sequía en ese estudio se refiere a la sequía agrícola –afectaciones en la vegetación– y no a la sequía meteorológica –déficit de precipitación–. Para detectar la ocurrencia de sequía agrícola se emplearon imágenes de satélite (Rojas *et al.*, 2014). En el caso de zonas áridas, es más difícil determinar, con esta técnica, la ocurrencia de una sequía, dado el tipo de vegetación natural en esas regiones.

Para caracterizar la ocurrencia del fenómeno de El Niño se utiliza el Índice Oceánico El Niño (ONI por sus siglas en inglés), que mide la anomalía de temperatura en la región del Pacífico Central conocida como la Región 3.4 (5°N-5°S, 120°-179°O). El índice mide la anomalía trimestral de temperatura y se determina la ocurrencia de un fenómeno de El Niño si se registra una anomalía de 0.5°C o más, en cinco mediciones trimestrales superpuestas. Si la anomalía observada es negativa en 0.5°C, se determina el fenómeno contrario, denominado La Niña. En la Figura 2 se presenta el registro histórico del Índice Oceánico El Niño, en el que pueden distinguirse los episodios registrados de El Niño y La Niña.

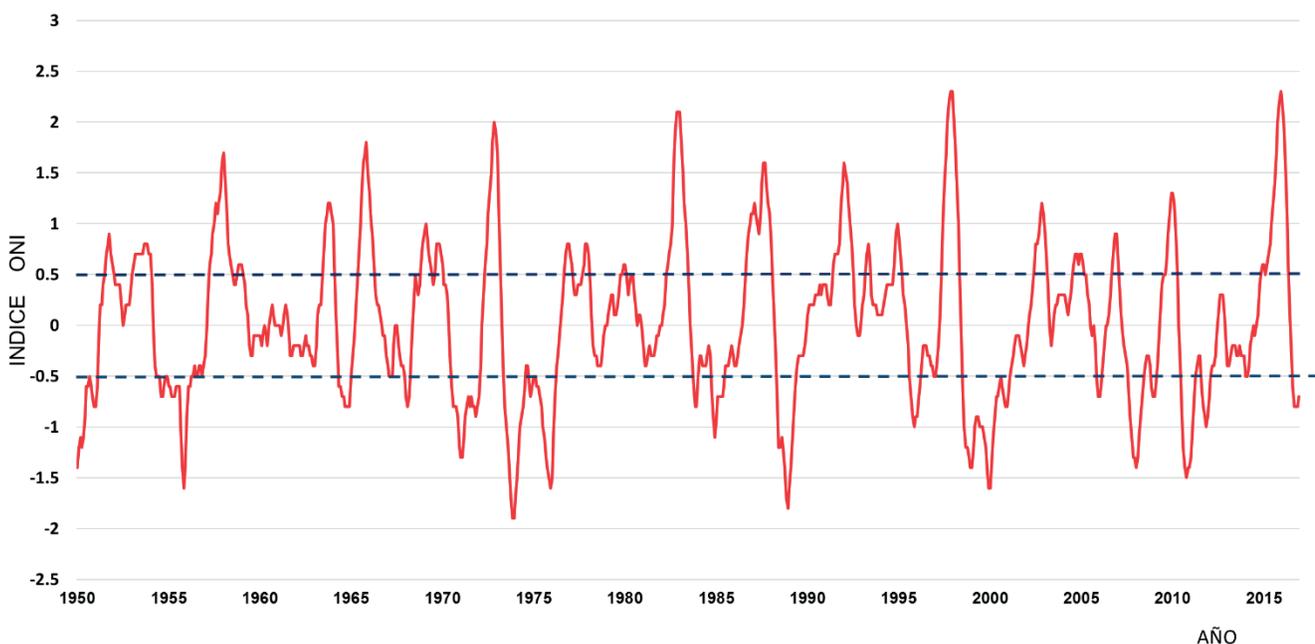


Figura 2 | Variación histórica del ONI, elaborada con datos de la NOAA (National Weather Service, 2017).

En la investigación cuyos resultados que se reportan en este texto, se identificaron para la zona en estudio las estaciones climatológicas existentes con información suficiente, y se calculó el valor del SPI en el periodo de registro. Se determinó la tendencia observada en la precipitación, que se compara con el comportamiento observado del ONI.

ZONA DE ESTUDIO

En México, una de las regiones que más sufren la escasez de agua, con periodos recurrentes de sequías, es la denominada región Mixteca, que se ubica parcialmente en los estados de Oaxaca, Puebla y Guerrero, la mayor parte en el primer estado. Por su

ubicación geográfica y elevación (entre 1200 y 2300 msnm), el clima en la región Mixteca es de tipo desértico y semidesértico. La Mixteca es una zona de gran importancia biológica y cultural, por el número de especies de flora y fauna endémicas que alberga, y por la presencia de comunidades indígenas Mixtecas, Triquis y Chocholtecas. El grado de marginación de la población de la región es alto, y su bienestar depende en gran medida de las lluvias estacionales de la región. Por estas razones, es de importancia el estudio de las tendencias de precipitación y de las sequías en esta región. En la Figura 3 se muestra la ubicación en México de la región Mixteca.

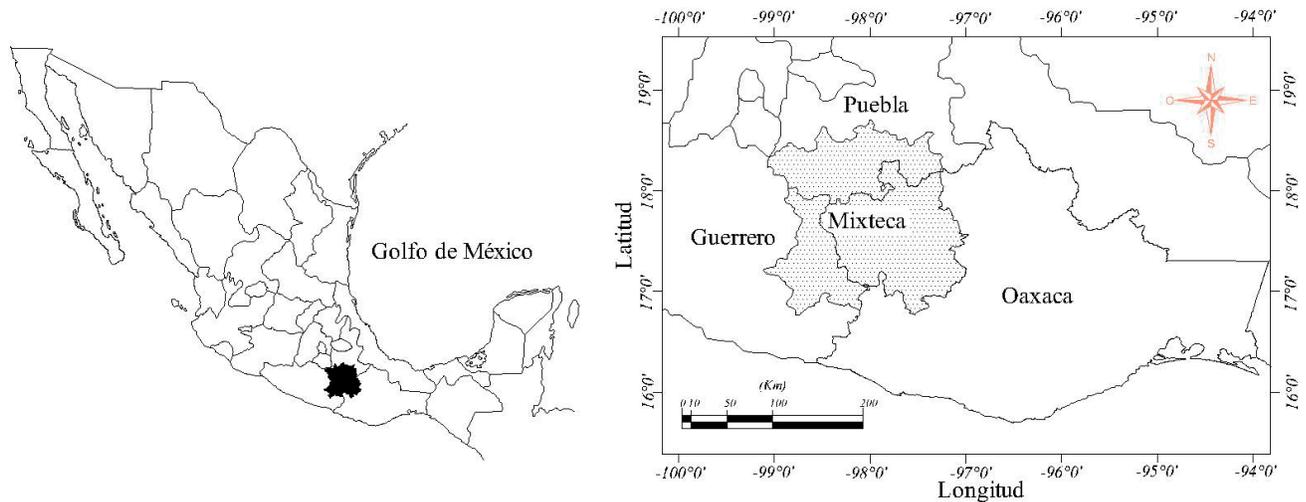


Figura 3 | Ubicación de la región Mixteca.

La región Mixteca es una zona ubicada en el sur de México, rica en diversidad biológica y cultural. Comprende la parte oeste de Oaxaca, sur de Puebla y este de Guerrero, su extensión es de 37229 km² aproximadamente y se extiende a 1752 localidades pertenecientes a 217 municipios, de los cuales 194 pertenecen a Oaxaca, 16 de Guerrero y 7 de Puebla.

Los mixtecos son el cuarto pueblo indígena más numeroso de México, después de los nahuas, los mayas y los zapotecos, se llaman a sí mismo como Ñuu Savi, lo que en español significa “Pueblo de la lluvia”. Actualmente esta región es compartida con amuzgos, triquis, ixcatecos, popolocas, chocholtecas, nahuas y afro mestizos de la costa.

La Mixteca tiene elevaciones sobre el nivel del mar de entre 1200 y 2300 metros, y está dividida en la zona Alta y la Baja. La zona Alta comprende el territorio arriba de los 1500 msnm, por lo que la Mixteca Baja comprende el territorio debajo de esa altitud. El clima es de tipo desértico y semidesértico, seco con excepción de las lluvias de verano.

Soares, Romero y López (2010) realizaron un análisis de vulnerabilidad social con miras al estudio del cambio climático. Definieron un índice que toma en cuenta aspectos de salud, educación, vivienda, empleo, ingreso y demografía. Como resultado, se determinó que la región de la Mixteca, es de alta vulnerabilidad social ante el cambio climático. La degradación de los suelos, ocasionada por deforestación, sobrepastoreo y prácticas agrícolas inadecuadas ha ocasionado un incremento de la marginación, en particular entre las poblaciones indígenas. Actualmente, la región Mixteca registra en su mayor parte grados de rezago social medios, altos y muy altos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se seleccionaron nueve estaciones meteorológicas, cuyo número de identificación, denominación, ubicación y periodo de registro se muestran en la tabla 4. Es de notar que la estación Huajuapán de León fue cambiada de ubicación, por lo que el registro que inicia en 1924 se interrumpe en 1969 y se reinicia en 1976, con la nueva ubicación. En algunas de las otras estaciones,

sobre todo en los años más antiguos de su funcionamiento, no se cuenta con datos, por lo que en algunos casos se tomaron solamente los años más recientes del registro, que en todos los casos son más de treinta. La información meteorológica procede de los bancos de datos publicados por la Comisión Nacional del Agua, y puede consultarse en el Extractor Rápido de Información Climatológica V 3.2 (IMTA - SEMARNAT, 2013). La ubicación de las estaciones seleccionadas puede observarse en la Figura 4.



Figura 4 | Ubicación en la región en estudio de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Para cada una de las estaciones, empleando la precipitación mensual registrada, se calculó y graficó el Índice Estandarizado de Precipitación, a fin de identificar los episodios tanto de precipitaciones extremas como de sequías. Se calcularon los SPI a diferentes intervalos: 3, 6, 9 y 12 meses.

Tabla 4 | Estaciones meteorológicas empleadas en el estudio.

ID	Estación	Longitud	Latitud	Altitud	Periodo	Precipitación anual (mm)
20035	Huajuapán de León	-97° 46' 59"	17° 48' 0"	1600	1924-1969	735.8
20275	Huajuapán de León	-97° 46' 0"	17° 48' 0"	1584	1976-2002	719.1
20157	Tepelmeme de Morelos	-97° 22' 0"	17° 52' 0"	2060	1950-1984	474.8
20129	Santa María de Ixcatlán	-97° 10' 59"	17° 51' 0"	1896	1954-1983	721.4
20076	Asunción Nochixtlán	-97° 13' 0"	17° 28' 0"	2080	1953-1988	455.3
21004	Acatlán de Osorio	-98° 3' 21.6"	18° 17' 49.2"	1427	1954-1992	620.4
21063	Piaxtla	-98° 15' 36"	18° 11' 60"	1119	1950-2009	931.4
20306	San Lorenzo Vista Hermosa	-98° 4' 4.8"	17° 57' 28.8"	1527	1980-2002	537.8
20133	Santiago Chilixtlahuaca	-97° 54' 0"	17° 51' 10.8"	2099	1971-2001	771.5

En la Figura 5 se presentan, a manera de ejemplo, los valores obtenidos para el SPI en la estación Piaxtla, que es una de las de registro más largo (60 años). Se puede observar una clara tendencia a una disminución de la precipitación en el SPI de doce meses, que precisamente ayuda en la determinación de tendencias de largo plazo. Puede observarse que la variación del SPI es mayor cuando se consideran periodos de 3 y 6 meses. Por ejemplo, en el periodo 1988-1994 se observan valores del SPI 3 mayores a 1.5, mientras que el SPI 12 se mantiene inferior a 0.5. Lo anterior hace evidente la ocurrencia de periodos cortos de

lluvias intensas, que en la zona en estudio están asociados a los efectos de tormentas tropicales en el Pacífico, pero que no alteran la tendencia climática general. Asimismo, se observa que hasta 1986 ocurrieron periodos de alta precipitación, pero a partir de ese año los valores del SPI 12 se han mantenido casi constantemente inferiores a 0, con un periodo largo de sequías entre 1989 y 1998.

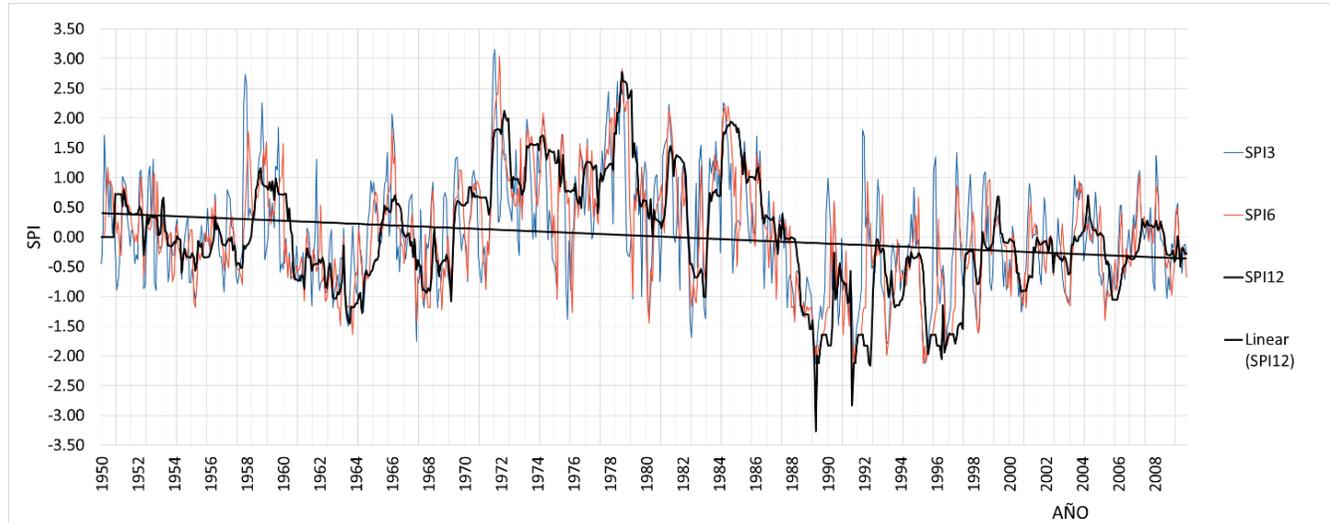


Figura 5 | Índice Estandarizado de Precipitación para tres (SPI 3), seis (SPI 6) y doce (SPI 12) meses. Se muestra también la tendencia lineal del SPI 12. Estación Piaxtla.

Este comportamiento de disminución en el SPI es una constante en todas las estaciones analizadas. En la Figura 6 se muestra el valor del SPI para doce meses en las estaciones analizadas, entre las que se ha omitido a Huajuapán de León, considerando que sufrió un cambio de ubicación y tiene un periodo importante sin información. Se observa la variación del SPI 12 en el rango del cual se tienen observaciones, y se grafica también el SPI 12 promedio de las estaciones analizadas, que permite observar la tendencia regional. Como puede notarse, el SPI 12 promedio exhibe una clara disminución de la precipitación, sobre todo a partir del año 1986. Es importante anotar que el ajuste lineal mostrado no es representativo de una correlación lineal, sino solamente un indicador de la tendencia general de la serie. Para determinar si existe o no una tendencia estadísticamente significativa, se aplicó la prueba Rho de Spearman. En la Tabla 5 se muestran los resultados para las estaciones estudiadas, y que determinan que en la región existe una tendencia estadísticamente significativa de disminución de la precipitación, para un coeficiente α de 0.05.

Tabla 5 | Resultados de prueba de tendencia para las estaciones analizadas.

Estación	Periodo analizado	Z_{SR}	$t_{(n-2, 1-\alpha/2)}$	Tendencia
Acatlán de Osorio	1954-1992	9.41	1.965	Tendencia negativa
Asunción Nochixtlán	1954-1975	0.2688	1.9737	No hay tendencia
Ixcatlán	1954-1979	5.411	1.9675	Tendencia negativa
Piaxta	1950-2009	6.986	1.963	Tendencia negativa
Santiago Chilixtlahuaca	1971-1994	9.83	1.968	Tendencia negativa
Tepelmeme de Morelos	1950-1984	4.333	1.9657	Tendencia negativa

Al aplicar la prueba Rho de Spearman a la serie del SPI 12 promedio, se encuentra que:

$$Z_{SR} = 9.19 ; t_{(n-2, 1-\alpha/2)} = 1.96$$

Es decir que $|Z_{SR}| > t_{(n-2, 1-\alpha/2)}$. Con lo cual se comprueba la existencia de una tendencia estadísticamente significativa en esta variable, en este caso de disminución de la precipitación.

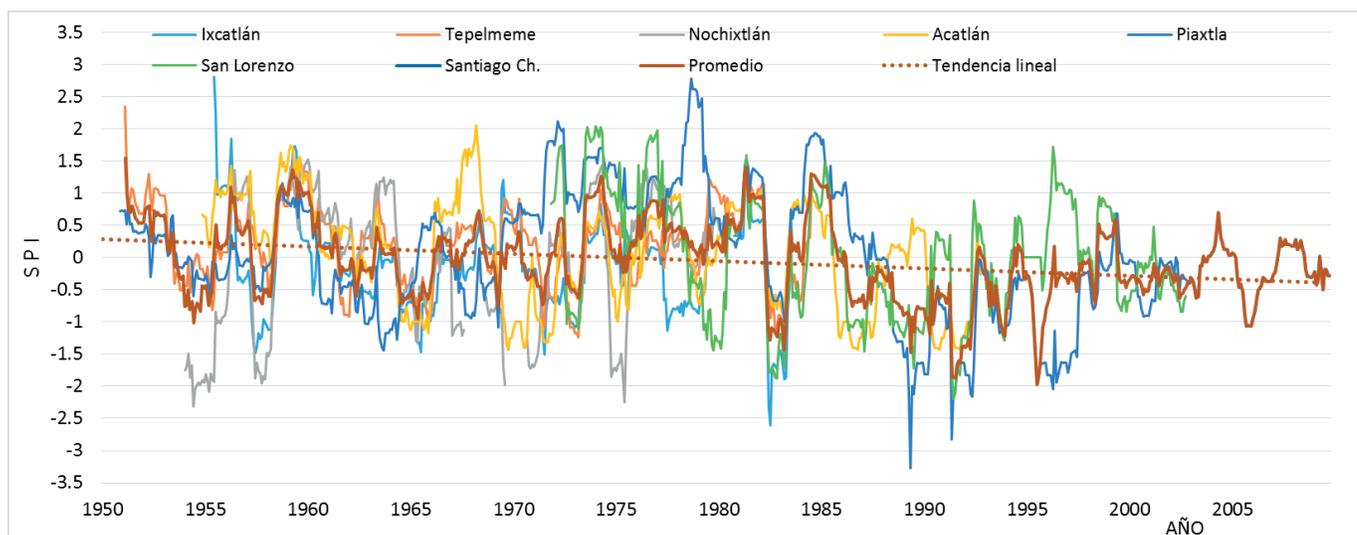


Figura 6 | SPI 12 para las estaciones analizadas. Se muestra también el SPI 12 promedio y su tendencia.

Para analizar la correlación entre la precipitación, a través del SPI y el ONI, en la Figura 7 se presenta una comparación entre el Índice Estandarizado de Precipitación de doce meses (SPI 12) promedio de la región, con el Índice El Niño Oceánico (ONI). La correlación que se observa entre ambos fenómenos es alta. Como se ha mencionado antes, la sequía tiene un origen multicausal; sin embargo, en este caso se puede observar que los años con mayor SPI corresponden a eventos La Niña, y los años con déficit de humedad de diferentes intensidades, a años de El Niño.

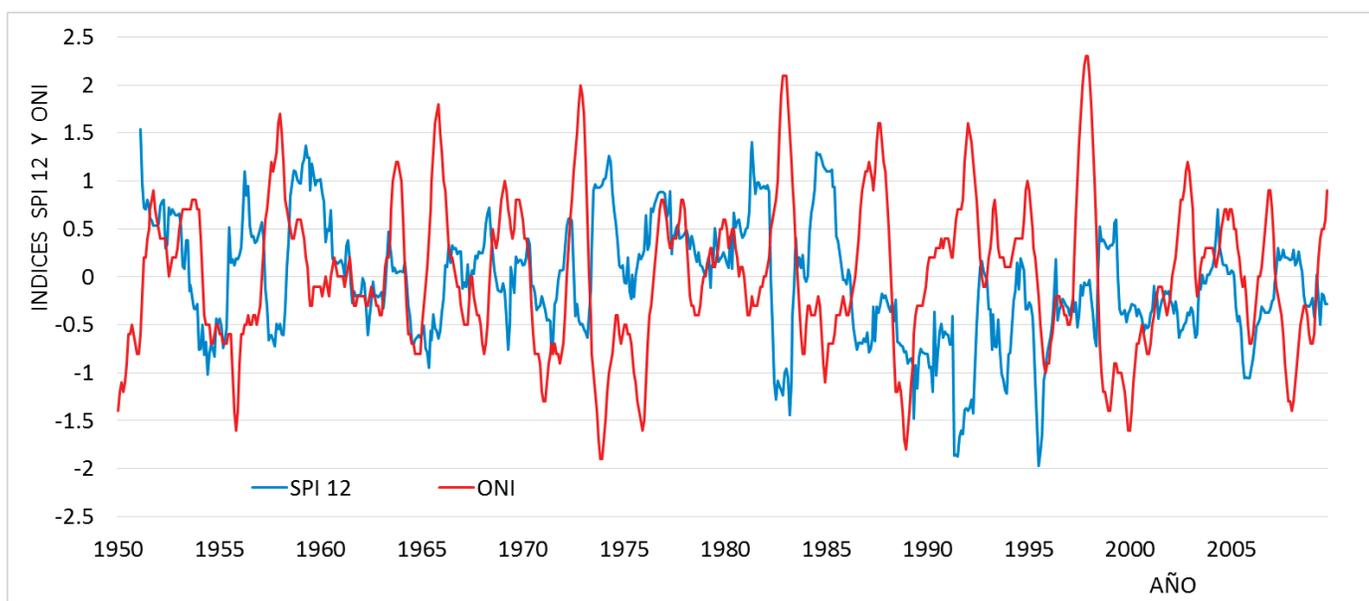


Figura 7 | Comparación del Índice Estandarizado de Sequía de doce meses (SPI 12), promedio de la región, con el Índice El Niño Oceánico (ONI).

En la Tabla 6 se resumen los eventos El Niño y la Niña ocurridos en el periodo en estudio, y se analiza su correlación con la condición de humedad de la zona en estudio. Se consideran solamente los eventos intensos, con valores del ONI iguales o mayores

a 1 para el caso de El Niño o iguales o menores a -1, para el caso de La Niña. Para una mejor interpretación, en la tabla se presentan en orden de intensidad, en lugar de en orden cronológico.

En el periodo de análisis se registraron 19 eventos intensos, diez El Niño y nueve la Niña. En el 90% de los casos de El Niño, la condición de la cuenca fue seca, desde ligeramente seca hasta extremadamente seca. En un solo caso de El Niño la condición de la cuenca fue cercana a lo normal. En el evento de La Niña, en el 78% de los casos la condición de la cuenca fue húmeda, y en dos casos de nueve, cercana a lo normal.

Se puede colegir que en los eventos El Niño la región tendrá tendencia a la sequía, en diversa intensidad, y que en los eventos La Niña, la región tendrá tendencia a condiciones húmedas. Sin embargo, no se observa una correlación exacta entre la intensidad de los eventos El Niño y La Niña y la magnitud de las condiciones húmeda o seca en la región. Esto se debe a que, como se ha dicho, la sequía tiene origen multicausal, de tal manera que se podría concluir que los eventos El Niño y la Niña favorecerán condiciones de sequía o precipitaciones altas, cuya intensidad dependerá también de otros factores.

Tabla 6 | Años con eventos La Niña y El Niño intensos, SPI y condición de la cuenca.

AÑO	ONI	EVENTO	SPI	CONDICIÓN DE LA CUENCA
1998	2.3	El Niño	-0.7	Ligeramente seco
1983	2.1	El Niño	-1.44	Muy seco
1973	1.9	El Niño	-0.6	Ligeramente seco
1966	1.8	El Niño	-0.65	Ligeramente seco
1957	1.7	El Niño	-0.72	Ligeramente seco
1987	1.6	El Niño	-0.79	Ligeramente seco
1992	1.5	El Niño	-1.42	Muy seco
1964	1.1	El Niño	0.1	Cercano a lo normal
2003	1.1	El Niño	-0.63	Ligeramente seco
1995	1	El Niño	-1.97	Extremadamente seco
1985	-1.1	La Niña	1.12	Moderadamente húmedo
1971	-1.3	La Niña	-0.7	Ligeramente seco
1999	-1.4	La Niña	0.56	Ligeramente húmedo
2008	-1.4	La Niña	0.26	Cercano a lo normal
1956	-1.6	La Niña	1.1	Moderadamente húmedo
1976	-1.6	La Niña	0.71	Ligeramente húmedo
2000	-1.6	La Niña	-0.47	Cercano a lo normal
1989	-1.8	La Niña	-1.4	Muy seco
1974	-1.9	La Niña	1.2	Moderadamente húmedo

En la Figura 8 se muestra un análisis de correlación entre los eventos La Niña vs. ONI (a) y El Niño vs. ONI (b), así como las ecuaciones de ajuste polinomial de quinto grado en ambos casos. El coeficiente de correlación entre los eventos El Niño y el ONI es de 0.94, mientras que el coeficiente de correlación entre los eventos La Niña y ONI es de 0.797. Se trata de coeficientes altos, que permiten deducir la existencia de una relación entre las condiciones de déficit de humedad en la región o humedad mayor de la normal en la región, y la ocurrencia del fenómeno La Niña/El Niño en la región. Es necesario enfatizar que la sequía o humedad extrema son fenómenos multifactoriales, por lo que de hecho pueden ocurrir excepciones a esta correlación.

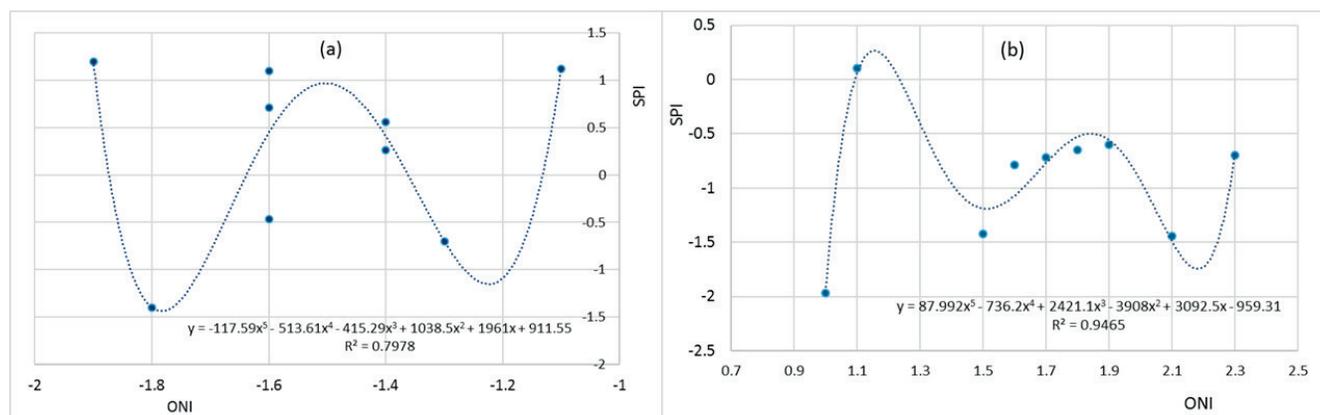


Figura 8 | Correlaciones entre La Niña (a), El Niño (b) y el SPI-12.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado, mediante el análisis histórico de datos en un periodo total de 60 años, que el Índice Estandarizado de Precipitación de la región Mixteca muestra una tendencia a la disminución. Esta tendencia a una menor precipitación se ha comprobado como estadísticamente significativa mediante la prueba de tendencia Rho de Spearman en las estaciones estudiadas en la región. Estos resultados se encuentran en la misma dirección esperada en los escenarios de cambio climático.

Se realizó un análisis comparativo entre el Índice Estandarizado de Precipitación y el Índice Oceánico El Niño, encontrándose una alta correlación entre condiciones de baja precipitación y sequías con el fenómeno de El Niño, para valores del ONI iguales o mayores a uno; así como una alta correlación entre condiciones de humedad mayor a la normal en el caso de ocurrencia de eventos La Niña para valores del ONI iguales o menores a menos uno.

Con estos resultados, analizando los pronósticos de El Niño y La Niña que realizan diversas organizaciones, será posible anticipar acciones de prevención y mitigación de los efectos de sequías en la Región Mixteca.

REFERENCIAS

- Ahmad, I., Tang, D., Wang, T.F., Wang, M., Wagan, B. 2015. Precipitation trends over time using Mann-Kendall and Spearman's Rho tests in Swat River Basin, Pakistan. *Advances in Meteorology*. Vol. 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/431860>
- Calahorrano, J., Manazno, M., Gualli, D., Silva, F., Audelo, M., Tingo, J. 2017. Análisis de tendencia en la precipitación anual (1964-2015) en la cuenca del Pastaza. Ecuador. *Agua LAC*, 9(2), Septiembre 2017, 73-84.
- Cerano Paredes, J Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda R. D., Méndez González, J., Constante V. 2011. Reconstructed droughts in the last 600 years for northeastern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 235-249.
- CONAGUA. 2017. *Monitor de Sequía - SPI*. Último acceso: 7 de Junio de 2017. Disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi>.
- Florescano, E. 2000. *Breve historia de la sequía en México*. Ciudad de México, Distrito Federal: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Goklany, I. M. 2009. Deaths and death rates from extreme weather events: 1900-2008. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 14(4), 102-109.

- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., Widhalm, M. 2011. The Lincoln declaration on drought indices. *American Meteorological Society*, April, 485-488. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>
- Hoeppe, P. 2016. Trends in weather related disasters -Consequences for insurers and society. *Weather and Climate Extremes*, 11, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.002>
- IICA. 2016. *El Niño en la agricultura de las Américas. Boletín Técnico 2016*. San José de Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)-Euroclima.
- IMTA - SEMARNAT. 2013. Eric III . *Eric III Extractor Rápido de Información Climatológica*. Versión 3.2. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INECC. 2016. *Escenarios de cambio climático. INECC Cambio Climático. 13 de Noviembre*. Último acceso: 7 de Junio de 2017. <http://escenarios.inecc.gob.mx/>.
- IPCC. 2007. *Climate 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. O Perry, O. Canziani, P. Palutikof y H.C. van del Linden. (Eds.) Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2012. *Gestión de los riesgos de fenómenos extremos y desastres naturales para mejorar la adaptación al cambio climático*. Informe Especial, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2013. Climate Change.
- IPCC. 2013. *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva.
- Lloyd-Hughes, B., Saunders, M. A. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>
- Maca, P., Pech, P. 2016. Forecasting SPEI and SPI Drought Indices Using the Integrated Artificial Neural Networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 17. <https://doi.org/10.1155/2016/3868519>
- Martínez-Austria, P. F., Bandala E. R. 2017. Temperature and heat-related mortality trends in the Sonoran and Mojave desert region. *Atmosphere*, 8(53). <https://doi.org/10.3390/atmos8030053>
- Marcos Valiente, O. 2001. Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*, 26. Último acceso: 10 de enero de 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17602604>.
- Nation Master. 2017. Economy, Population below poverty line. *Centro masivo de datos en Internet*. Consultado el 14 de diciembre de 2017. Disponible en <http://www.nationmaster.com/country-info/stats/Economy/Population-below-poverty-line#2010>
- National Weather Service. 2017. *Cold & Warm Episodes by Season*. 5 de 6. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears_1971-2000_climo.shtml.
- Ortega Gaucin, D. 2013. Impacto de las sequías en Nuevo León. *Ciencia UANL* (Universidad Autónoma de Nuevo León), 63, 8-14.
- Otkin, J. A., Anderson, M. C., Hain, C., Svoboda M. 2015 Using temporal changes in drought indices to generate probabilistic drought intensification forecast. *Journal of Hydrometeorology* (American Meteorology Society) 16, 88-105. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0064.1>
- Peterson, Larry C., Gerald, H. H. 2005. Climate and the collapse of Maya civilization. *American Scientist*, 93, 322-329. <https://doi.org/10.1511/2005.54.968>
- Randall, D. A., Word, R. A. 2007. Climate models and their evaluation. En *IPCC, Climate 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, 589-662. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rojas, O., Li, Y., Cumani, R. 2014. *Understanding the drought impact of El Niño on the global agricultural areas: an assessment using FAO's Agricultural Stress Index*. Rome: FAO.

Salinas Prieto, J. A., Colorado Ruiz, G., Maya Magaña, M. E. 2015. Escenarios de Cambio Climático para México. En *Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático*, 41-70. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Soares, D., Romero, R., López, R. 2010. Índice de vulnerabilidad social. En *Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático*, editado por P Martínez Austria y C. Patiño Gómez, 9-38. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Tian, M., Wang, P., Khan, J. 2016. Drought forecasting with vegetation temperature condition index using ARIMA models in the Guanzhong Plain. *Remote sensing* 8 (690). <https://doi.org/10.3390/rs8090690>

World Meteorological Organization. 2014. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2012). Geneva.

Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G. 2002. Power of Mann-Kendall and Spearman's Rho tests detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259, 254-271. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)