

TENDENCIAS DE SEQUÍA EXTREMA EN PUEBLA: ÍNDICES CLIMÁTICOS Y SOCIOECONÓMICOS CON IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL AGUA

María de los Ángeles **Velasco-Hernández**¹, Wendy J. **Ascencio-López**², Martín **Neri-Suárez**³, Miguel A. **Hernández-Espinosa**¹
Ma. Dolores **Guevara-Espinosa**⁴, Enrique **Salgado-Villavicencio**⁴

¹Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Ciudad Universitaria. 72570.

²Posgrado en Ciencias Ambientales de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Ciudad Universitaria. 72570.

³Universidad Politécnica de Puebla. Tercer Carril del Ejido, Serrano s/n. 72640. Cuanalá, Puebla, México.

⁴Facultad de Ingeniería Química. 18 sur y avenida San Claudio. Ciudad Universitaria S.N. C.P. 72570.

*Autor de correspondencia: angeles.velasco@correo.buap.mx

RESUMEN

Las sequías han causado daños en gran parte del estado, generando consecuencias económicas, sociales y ambientales. Esto ha provocado tensiones y conflictos sociales y políticos por el uso del agua a nivel local y municipal. Por ello, es importante generar conocimiento sobre el estado actual y la evolución de las sequías y sus afectaciones, debido al impacto que tienen en diversas actividades humanas y en otros ámbitos. El objetivo de la presente investigación, es analizar las principales bases de datos para identificar la exposición por sequía que presenta el estado de Puebla como componente importante de vulnerabilidad y riesgo. La metodología empleada, fue cuantitativa a través de la exploración del monitor de sequía de CONAGUA, el software RCLimDex, basado en series de tiempo mensuales de índices climáticos, para analizar tendencias de variables meteorológicas, así como indicadores socioeconómicos de bases de datos de Instituciones Gubernamentales, para identificar factores de exposición y sensibilidad y que, junto con la capacidad adaptativa, determinan el grado de vulnerabilidad. Los resultados indican que en los últimos años, se incrementaron los periodos de sequía afectando diversos municipios principalmente en la Sierra Norte y Nororiental, así como la mixteca poblana, incrementando la vulnerabilidad climática por sequía, principalmente por el evento El Niño Oscilación del Sur. Esto representa una aportación interesante, al haber pocas investigaciones a nivel estatal que analicen estas bases de datos importantes en la detección de vulnerabilidad a la sequía. Además, beneficia a los tomadores de decisiones en la gestión y manejo adecuado del recurso agua.

Palabras clave: gestión del riesgo, monitor de sequía de CONAGUA, RCLimDex.

INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2023) menciona que, en los últimos años en distintos países, se ha presentado un aumento significativo en la frecuencia, magnitud y duración de los eventos de sequía, en comparación con los registros realizados a inicios del siglo XX. Los escenarios climáticos (RCP8,5) estiman con un nivel de confianza medio que, para finales del siglo XXI, varias regiones secas experimentarán una disminución en la humedad del suelo y un mayor riesgo de sequías agrícolas, debido al aumento de las temperaturas superficiales. En países de gran extensión, una sequía no llega a afectar la totalidad del territorio; no obstante, las regiones afectadas sí presentan impactos relevantes en la economía y la sociedad (IPCC, 2013). Por ello, existe un fuerte interés científico y social en comprender los factores que conducen a eventos extremos para mejorar la gestión de los riesgos asociados con amenazas como las sequías (Felsche y Ludwig, 2021).

Citation: Velasco-Hernández MÁ, Ascencio-López WJ, Neri-Suárez M, Hernández-Espinosa MA, Guevara-Espinosa MD, Salgado-Villavicencio E. 2024. Tendencias de sequía extrema en Puebla: índices climáticos y socioeconómicos con implicaciones para la gestión del agua. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i1.1627>

Editor in Chief:
Dr. Benito Ramírez Valverde

Received: July 3, 2023.
Approved: August 14, 2023.

Estimated publication date:
December 14, 2023.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



Estas se caracterizan por una disminución en la precipitación con respecto a un valor normal (media climatológica) que aumenta su impacto ambiental, económico y social cuando la duración es demasiado prolongada. Este fenómeno se presenta con la alteración de los patrones de circulación general atmosférica y oceánica, que a su vez afecta las regiones tropicales, influenciada por la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) y eventos como El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Para América del Sur, la cordillera de los Andes también interviene como otro forzante climático. Además, las actividades humanas, influyen sobre el cambio climático y los eventos extremos como son las sequías, derivado de la deforestación, los cambios de uso de suelo y el incremento en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), factores que provocan la degradación, erosión y desertificación (Matailo *et al.*, 2019).

Con respecto a la disponibilidad de bases de datos, se encuentra el Atlas de Sequías de América Latina y el Caribe, generando una referencia sobre la frecuencia del fenómeno. A través de la generación de información climática más sólida para la toma de decisiones, el Atlas apoya directamente a la gestión proactiva de las sequías en la Región (Núñez y Verbist 2018). En México, se cuenta con el Monitor de sequía de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el cual se fundamenta en el Monitor de sequía de E.U. (2023) (USDM, por sus siglas en inglés), el cual identifica áreas en sequía y las etiqueta por intensidad. El mapa utiliza cuatro categorías de sequía, desde D1, la menos intensa, hasta D4, la más intensa. Proporciona información sobre el terreno para ayudar a comprender mejor las condiciones locales e identificar áreas que podrían necesitar más atención. El objetivo de la investigación, fue analizar las principales bases de datos para identificar la exposición por sequía que presenta el estado de Puebla.

MARCO TEÓRICO

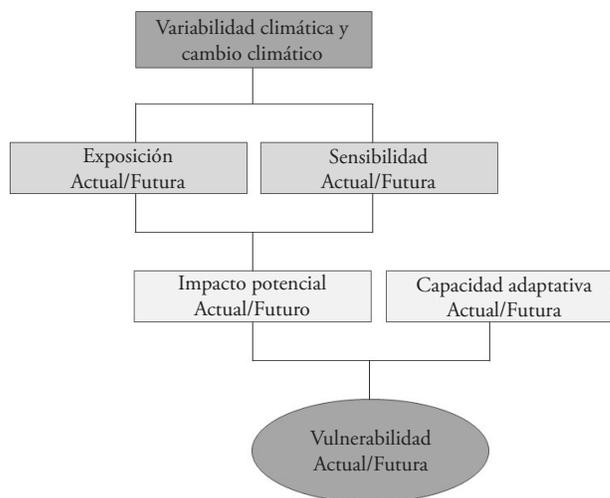
Se define la sequía como un período de condiciones anormalmente secas que persisten lo suficiente para causar un grave desequilibrio hidrológico (OMM, 1992). Este término es relativo, ya que carece de una definición universal y su clasificación varía según diversos criterios y autores. Cualquier investigación sobre el déficit de precipitaciones, debe considerar la actividad específica relacionada con el tipo de precipitación que se está examinando. Wilhite y Glantz (1985), clasificaron la sequía en función de la disciplina científica que se ocupa de su estudio, distinguiendo entre sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Todo período con déficit anormal de precipitación se define como sequía meteorológica (IPCC, 2018), mientras que en la sequía agrícola se presentará un déficit de humedad en el suelo incidiendo en la producción de los cultivos o la función de los ecosistemas en general, y durante la estación de escorrentía y percolación afecta principalmente a los aportes hídricos (sequía hidrológica). La humedad y las aguas subterráneas almacenadas por el suelo, también resultan afectadas por los aumentos en la evapotranspiración real y por las disminuciones en la precipitación. Finalmente, como consecuencia de los tipos de sequía anteriores surge la sequía socioeconómica, generando efectos desfavorables en los ámbitos social y económico (Mishra y Sing, 2010; Coronel, 2013).

Los problemas producidos por las sequías no se reflejan solamente en la producción, productividad y rendimientos económicos, que puede llevar a la disminución del nivel de vida y la salud, al aumento de la pobreza o migración (Calvo-Solano *et al.*, 2018; Nuñez y Verbist, 2018). Paralelamente, también se generan problemas en los recursos naturales, como la degradación de suelos y, por ende, la pérdida de biodiversidad. Estos efectos se conocen conjuntamente como desertificación, y se están presentando con mayor intensidad y frecuencia debido al cambio climático y ocurrencia reiterada de eventos atmosféricos extremos atribuibles a las actividades antropogénicas que alteran la composición atmosférica (Matailo *et al.*, 2019). El impacto de las sequías, se magnifica cuando las autoridades no demuestran un compromiso firme para adoptar nuevas directrices gubernamentales que puedan enfrentar y mitigar los efectos del déficit hídrico (ONU, 2019).

En tales circunstancias, los conflictos sociales y políticos derivados de la escasez de agua tienden a agudizarse. Las evidencias sugieren que la frecuencia, duración e intensidad de las sequías han aumentado, especialmente en los trópicos y subtropicos, desde la última mitad del siglo XX en respuesta al cambio climático global (IPCC, 2012). En 2009, México experimentó lo que se considera la segunda peor sequía en sesenta años, la cual fue seguida por un episodio mucho más severo en 2011. Este último evento cubrió aproximadamente 80% del territorio nacional prolongándose hasta 2013, aumentando su cobertura 90%. Los sectores agrícola y ganadero, fueron afectados principalmente por la escasez de agua, lo que resultó en pérdidas por un total de 7,751 millones de pesos (aproximadamente 700 USD millones a precios de 2011), según datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2012, CONAGUA, 2019 y Méndez, 2013). Por lo tanto, la vulnerabilidad ante la sequía, se vincula no solamente con la duración y la cobertura geográfica del evento, sino también a la capacidad de la sociedad para anticipar, enfrentar, resistir y recuperarse de sus efectos. La vulnerabilidad está influenciada por la naturaleza, la magnitud y la rapidez de las variaciones climáticas a las que un sistema está expuesto, así como por su sensibilidad y su capacidad de adaptación (PECC, 2014).

Es importante mencionar que la falta de una definición concreta de vulnerabilidad, especialmente en lo que respecta a la sequía, se debe a las distintas maneras en las que ha sido conceptualizada según los objetivos y métodos para su análisis, así como de los contextos específicos (Zarafshani *et al.*, 2016). En México, se ha adoptado la definición de vulnerabilidad al cambio climático establecida por el IPCC (2014) en su legislación nacional. Esta definición enfatiza que el análisis de la vulnerabilidad de un sistema debe tener en cuenta tres elementos esenciales: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (Figura 1).

La exposición se refiere al carácter, magnitud y velocidad de cambio y variación del clima que afecta a un sistema. La sensibilidad está relacionada con el grado en que dicho sistema es afectado por la variabilidad y cambio climático, lo cual está influenciado por las características que lo definen. Por otro lado, la capacidad adaptativa se basa en los recursos, tanto humanos como institucionales, que posibilitan la instauración de procesos de ajuste frente a un problema climático particular (IPCC, 2007). En otras palabras, se trata de los elementos de naturaleza colectiva que pueden reducir el impacto potencial. Por ello, esta investigación, se enfoca en la intensidad de la sequía (exposición) desde la dimensión



Fuente: INECC, 2016.

Figura 1. Componentes del Modelo de Vulnerabilidad actual y futura de acuerdo con el concepto del IPCC (2007).

de referencia temporal, así como identificar factores que inciden en la sensibilidad de los municipios que apoyen en la gestión del riesgo. Sus resultados son fundamentales para respaldar la gestión del riesgo, que se refiere a la probabilidad de que ocurra una sequía que afecte la integridad y el desarrollo de un objeto o fenómeno social específico (Varela *et al.*, 2020).

En ese sentido, Lobato *et al.* (2019), proponen implementar una base de datos para pronosticar y predecir la sequía y generar información robusta relacionada con diferentes escalas de tiempo (mensual, estacional, entre otras), similar al programa de los Estados Unidos denominado Sistema Nacional Integrado de Información de la Sequía (NIDIS, por sus siglas en inglés, 2007). Este sistema puede ayudar a los usuarios a tomar decisiones informadas para reducir los riesgos asociados a la sequía. Por lo que, un sistema de alerta temprana ante la sequía que contemple al análisis metodológico de los posibles impactos bajo escenarios realistas puede ayudar en gran medida a las instituciones oficiales, iniciativa privada y usuarios a actuar antes de la ocurrencia y por ende reducir los riesgos asociados (Lobato *et al.*, 2019).

METODOLOGÍA

Se consideraron tres fases de desarrollo para este estudio. En la primera, se revisaron los registros mensuales del Monitor de Sequía en México (MSM), correspondientes al período de enero 2003 a diciembre 2020 para el estado de Puebla. Se obtuvieron las frecuencias absolutas de las diferentes condiciones de sequía meteorológica que se presentaron mensualmente a nivel municipal, y se mapearon los municipios con mayor incidencia de sequía extrema, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Es importante destacar que el MSM se basa en la obtención e interpretación de diversos índices o indicadores de sequía. Entre estos se incluyen el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI),

la Anomalía de Lluvia en Porcentaje de lo Normal, el Índice Satelital de Salud de la Vegetación (VHI), el Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket (Centro de Predicciones Climáticas. Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica) CPC-NOAA, el Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI), la Anomalía de la Temperatura Media, el Porcentaje de Disponibilidad de Agua en las presas del país y la aportación de expertos locales. Estos elementos se utilizan para clasificar la sequía según su intensidad, es decir, el grado en que las condiciones de humedad difieren de las normales. Esta clasificación se basa en los estándares empleados por el Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM) y el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM) (Cuadro 1).

La segunda fase, consistió en analizar las variables meteorológicas de las estaciones de CONAGUA a través del programa RCLimDex, para aquellos municipios que en el año 2019 presentaron sequía extrema (Francisco Mena, Jalpan, Pantepec, Tlacuilcotepec, Xicotepec, Zihuateutla y Venustiano Carranza) y que contarán con estación meteorológica activa. Sin embargo, solo Pantepec y Xicotepec tenía datos completos mientras que Jalpan y Francisco Mena contaban con años faltantes en sus registros.

Cuadro 1. Clasificación de la sequía de acuerdo con sus condiciones, intensidad y probabilidades.

Categoría	Intensidad	Condición de sequía	Probabilidad en percentil
D0	Anormalmente seco	No se considera una categoría de sequía sino una condición de sequedad presente al inicio y al final de un periodo de sequía. Al inicio puede ocasionar retraso de la siembra de cultivos anuales, limitado crecimiento de cultivos o pastos y riesgo de incendios. Al final puede persistir el déficit de agua, pastos y cultivos pueden no recuperarse completamente.	20 a ≤ 30
D1	Sequía moderada	Se presentan algunos daños en pastos y cultivos, riesgo de incendios, bajos niveles en arroyos, embalses, ríos, abrevaderos y pozos, se sugiere restricción voluntaria.	10 a ≤ 20
D2	Sequía severa	Probables pérdidas en cultivos o pastos, alto riesgo de incendios, escasez de agua, se debe imponer restricciones en el uso del agua.	5 a ≤ 10
D3	Sequía extrema	Pérdidas mayores en cultivos y pastos, extremo riesgo de incendios forestales, se generalizan las restricciones en el uso del agua por su escasez.	2 a ≤ 5
D4	Sequía excepcional	Pérdidas excepcionales y generalizadas de pastos y cultivos, riesgo excepcional de incendios, escasez de agua en arroyos, embalses y pozos. Probable situación de emergencia por ausencia de agua.	≤ 2

Nota: Cada categoría está asociada con la probabilidad de ocurrencia del percentil para un periodo de retorno de 100 años.
 Fuente: elaboración propia a partir de Lobato, 2016 y MSM 2023.

En la tercera fase, se revisaron las características socioeconómicas como son población total, rezago educativo, pobreza y grado de marginación de los municipios mencionados anteriormente, utilizando las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional de Población (CONAPO), y la Comisión Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Los resultados se representaron espacialmente con el propósito de identificar los municipios donde estas características inciden en la sensibilidad y capacidad adaptativa, y en su vulnerabilidad. Esta aproximación concuerda con el concepto de vulnerabilidad definido por el IPCC (2012a). Este concepto se refiere a la propensión o predisposición a ser afectado negativamente e involucra diversos aspectos. Entre estos aspectos se encuentran la sensibilidad o susceptibilidad al daño, así como la falta de capacidad para responder y adaptarse.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Incidencia de sequía a nivel municipal de acuerdo con el Monitor de Sequía de México

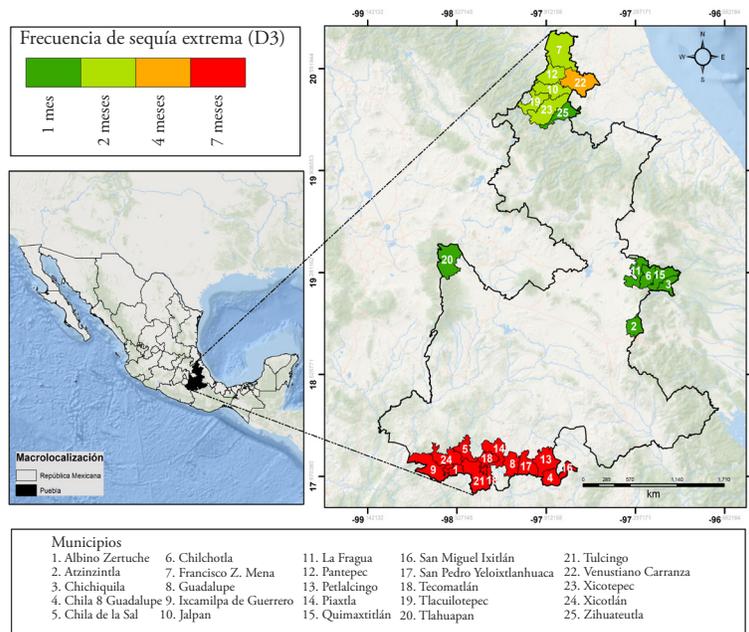
Según los datos proporcionados por el Monitor de Sequía de México, durante el periodo de enero de 2003 a diciembre de 2022, se han reportado en el estado de Puebla diferentes grados de sequía. Estos van desde sequía anormalmente seca (D0), hasta sequía extrema (D3), no se han reportado incidentes de sequía excepcional en este período (Cuadro 2). Se observó que los 217 municipios que conforman el estado (100% del territorio poblano), ha presentado el grado anormalmente seco, así como sequía moderada en diferentes momentos del periodo 2003 a 2022. Es importante resaltar que, si bien la condición denominada anormalmente seco, no es una categoría de sequía, tiene relevancia por presentarse al inicio y final de la sequía. Por otro lado, la sequía severa se ha manifestado en casi todos los municipios del estado, excepto Coxcatlán y Coyomeapan. Significa que 215 municipios han experimentado este tipo de sequía. En el caso de la sequía extrema, se presentó en el municipio de Albino Zertuche, Atzitzintla, Chichiquila, Chila, Chila de la Sal, Chilchotla, Francisco Z. Mena, Guadalupe, Ixcamilpa de Guerrero, Jalpan, Lafragua, Pan-tepec, Petlalcingo, Piaxtla, Quimixtlán, San Miguel Ixítlán, San Pedro Yeloixtlahuaca, Tecomatlán, Tlacuilotepec, Tlahuapan, Tulcingo, Venustiano Carranza, Xicotepec, Xicotlán y Zihuateutla. Estos representaron 12% de los municipios del estado de Puebla (Figura 2).

Cuadro 2. Clasificación de sequía en municipios del Puebla.

Grados de sequía	Categoría	Porcentaje de municipios (%)
Anormalmente seco	D0	100
Moderada	D1	100
Severa	D2	99
Extrema	D3	12

*Porcentaje de municipios en el territorio que han presentado el grado de sequía al que se hace referencia durante algún mes o meses del periodo 2003-2020.

Fuente: elaboración propia con datos del Monitor de Sequía de México [MSM] (2023).



Fuente: elaboración propia con datos del Monitor de Sequía de México [MSM] (2023).

Figura 2. Ubicación de municipios con reporte de sequía categoría extrema y su frecuencia en meses.

De acuerdo con la Figura 2, los municipios que reportaron sequía extrema se localizan en las regiones de Sierra Norte, Valle Serdán, Angelópolis y la Mixteca poblana. En esta última, la sequía tuvo una mayor duración, a 7 meses, lo que afectó a 12 municipios durante 2003. En el Valle Serdán este grado de sequía se presentó en el 2011 con una duración menor en cinco municipios, además del municipio de Tlahuapan de la región de Angelópolis. Para el año, 2019 la sequía extrema se presentó en la Sierra Norte en los municipios Francisco Z. Mena, Jalpan, Pantepec, Tlacuilotepec, Venustiano Carranza, Xicotepec y Zihuateutla. La importancia de identificar la sequía (extrema) en estos municipios radica en que ésta, se caracterizó por acarrear pérdidas mayores en cultivos y pastos y riesgo extremo de incendios forestales, por lo que el uso del agua debe restringirse debido a su escasez. No obstante que el grado de sequía conlleva cierta severidad, el aumento de frecuencia e intensidad generan impactos por la exposición a estos episodios. Esta frecuencia se representa en las siguientes gráficas (Figura 3).

Los panoramas de eventos de sequía han variado por región. Las sequías moderadas se han presentado en la mayor parte del territorio durante diferentes años de 2003 a 2022 (excepto en los municipios de Coxcatlán y Coyomeapan). En la región de Angelópolis y en el Valle de Atlixco y Matamoros, la frecuencia de ocurrencia de sequía moderada fue menor que en otras regiones. Mientras que la sequía severa fue poco frecuente y la extrema, no fue reportado para la región de Angelópolis. En contraste, la región Norte, Nororiental y la región de Tehuacán y Sierra Negra reportaron una mayor frecuencia de periodos anormalmente



Fuente: elaboración propia con datos del Monitor de Sequía de México [MSM], (2023).
Figura 3. Frecuencia de eventos de sequía en Puebla por región y municipio de 2003 a 2022.

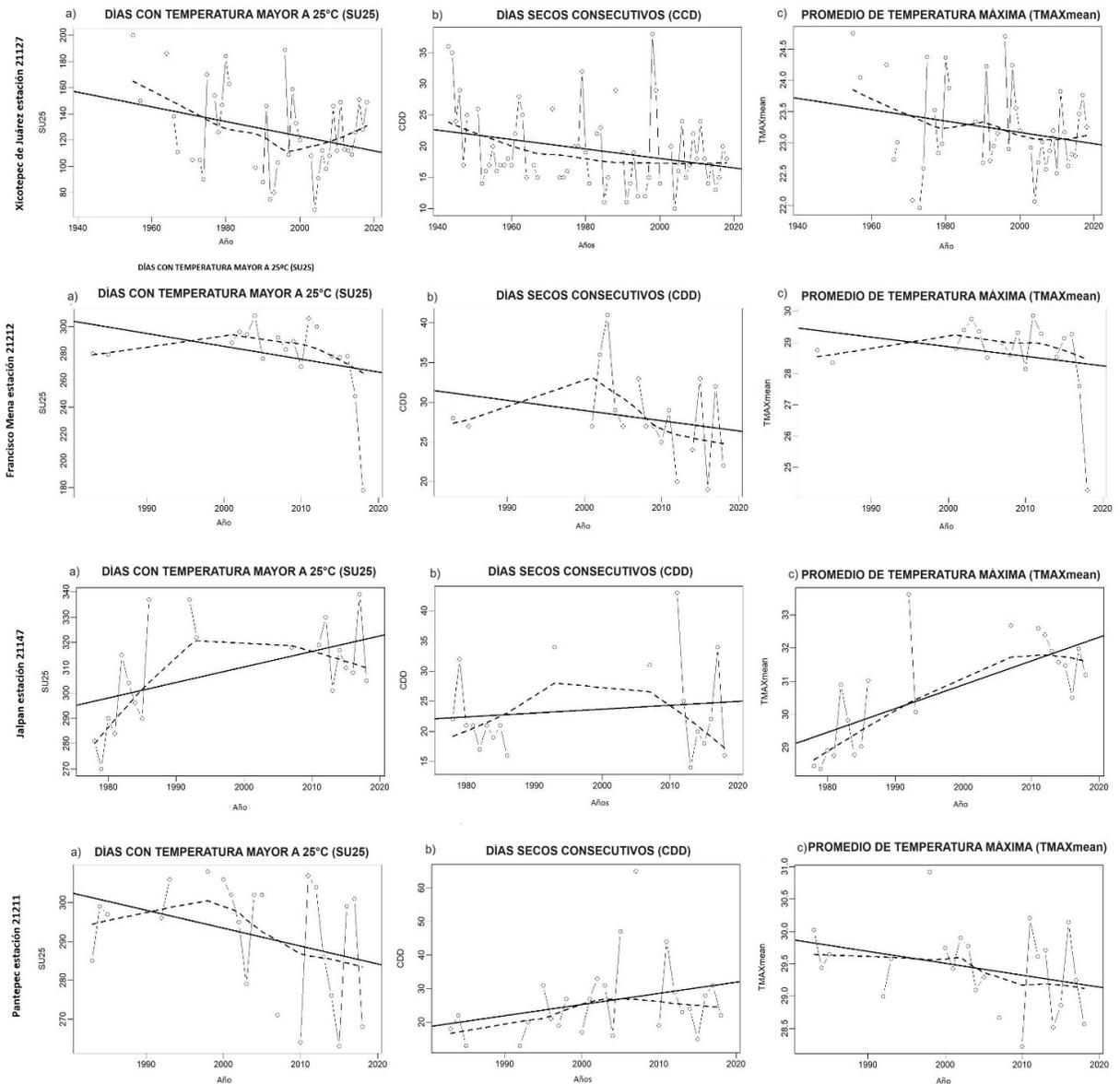
secos. En las dos primeras, se presentan sequías moderadas y en el caso de la Sierra Norte se reportan sequías extremas.

Por su parte, la Mixteca poblana muestra la mayor afectación por la frecuencia de eventos de sequía. Al contrastar los resultados de este análisis del monitor de sequía con otros, se encontró que existen pocos a nivel estatal y para Puebla no se encontraron, siendo estos datos fundamentales para la aplicación de iniciativas más completas para reducir los riesgos e impactos asociados con las sequías (Lobato, 2016). En este sentido, es fundamental abordar el desarrollo de índices de sequía y modelos predictivos basados en datos meteorológicos confiables. La creación de índices específicos para el estado de Puebla, permitiría una evaluación más precisa y contextualizada de las condiciones de sequía, brindando información valiosa para la toma de decisiones informadas. Modelos de predicción basados en datos meteorológicos confiables, pueden proporcionar pronósticos tempranos de sequías potenciales, lo que es esencial para la planificación y la preparación (Nandgude, 2023).

Índices de sequía estimados con RCLimDex

Los resultados muestran una serie histórica de los índices climáticos que inicia en 1947, 1977 y 1982 hasta 2020, sin embargo, en algunas estaciones sólo hay registros con el 60% de los datos. El software RCLimDex proporciona 27 índices climáticos de los cuales se seleccionaron tres relacionados al presente estudio (Velasco *et al.*, 2015). Estos son SU25, el cual representa los días en que la temperatura es mayor a 25°C; el índice CDD indica los días secos consecutivos y el índice TMÁXmean se refiere al promedio de la temperatura máxima. La Figura 4 muestra pendientes lineales y no lineales con tendencias positivas y negativas que describen el comportamiento de tres índices climáticos y que contribuyen a complementar la información del Monitor de Sequía en México (MSM), de esta forma, identificar patrones de comportamiento climático que inciden en la exposición y en la vulnerabilidad. Para el municipio de Xicotepec, en a), se muestra una alta variabilidad en la cual la tendencia no lineal describe el comportamiento relacionado con aumentos de temperatura, mientras que, en los otros índices, hay una tendencia a disminuir. En el municipio de Francisco Z. Mena, los tres índices climáticos muestran una tendencia a disminuir. Es interesante que en los días secos consecutivos se muestran años relevantes como 2004 y 2011. Por otra parte, en el municipio de Jalpan, se muestran tendencias a un aumento en los tres índices climáticos. Con respecto al municipio de Pantepec, se muestra un aumento en los días secos consecutivos y en los índices SU25 y TMÁXmean, se observa una disminución.

El análisis de dichas tendencias no muestra diferencias significativas. Por lo tanto, es probable el evento El Niño Oscilación del Sur (ENOS) pueda estar presente, lo cual afecta considerablemente a los patrones de viento, la temperatura superficial del mar y la precipitación en el Pacífico tropical. Sus efectos influyen en el clima de toda la región del Pacífico y de muchas otras partes del mundo, a través de teleconexiones que se extienden a lo largo del planeta (IPCC, 2018). Un sistema de alerta temprana para la sequía, que contemple al análisis metodológico de los posibles impactos bajo escenarios realistas, puede ayudar en



Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA, (2023).

Figura 4. Resultados del tratamiento de bases de datos de estaciones meteorológicas con RClmDex.

gran medida a las instituciones oficiales, el sector privado y otros usuarios. Esto les permitirá tomar medidas preventivas antes de que ocurra la sequía y reducir los riesgos asociados (Cortez *et al.*, 2020). Estos eventos climáticos pueden tener implicaciones severas en el uso del agua de riego, causar estrés fisiológico en los cultivos, aumentar la incidencia de enfermedades respiratorias y cardíacas, y favorecer los ciclos de reproducción y las poblaciones de insectos (Ruíz *et al.*, 2020). Hay estudios que muestran una integración de datos

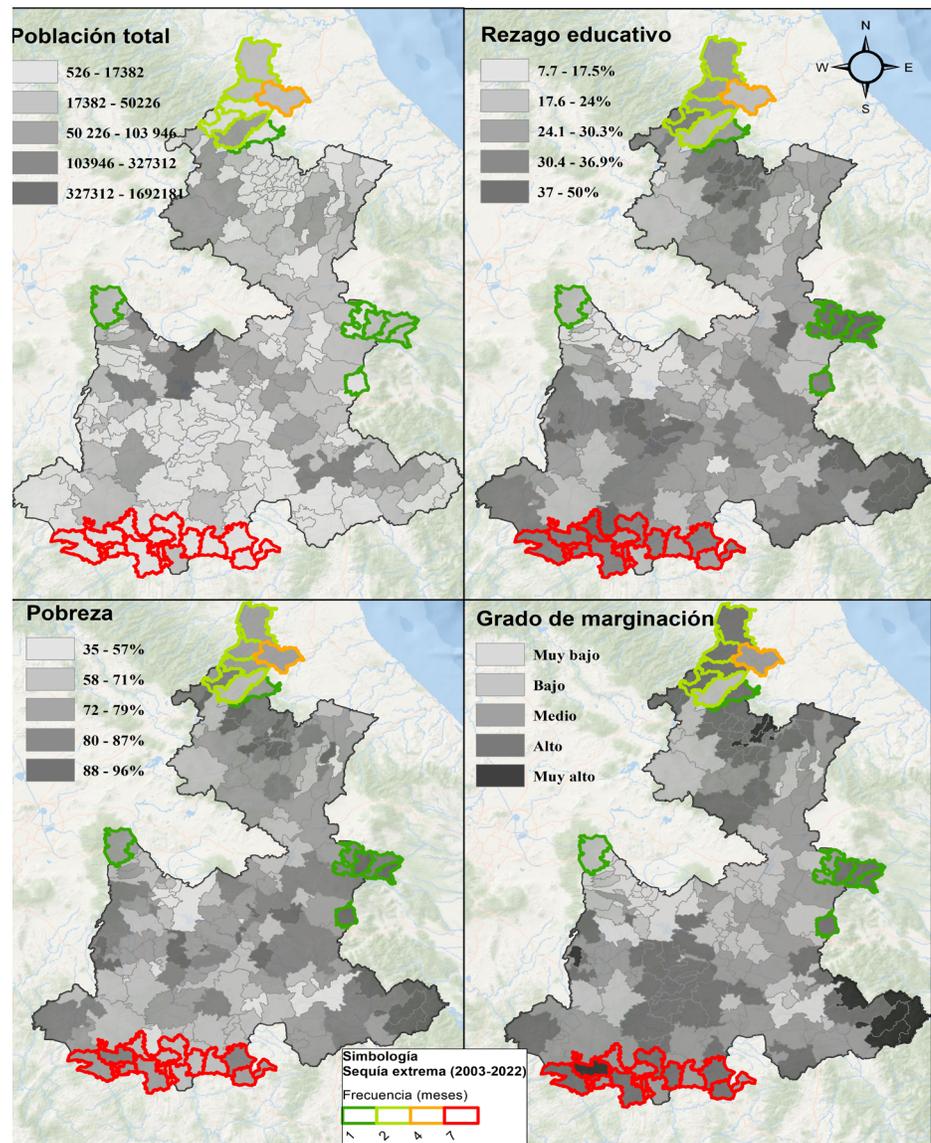
de teledetección, observaciones meteorológicas, modelos hidrológicos e índices climáticos para mejorar la precisión en pronosticar las sequías (Nandgude *et al.*, 2023). Por lo que es probable que haya teleconexiones, debido a que hay tendencias de valores descendentes en los índices climáticos de las variables SU25, CDD y TMÁXmean no correspondientes con la variabilidad de las bases de datos de las estaciones meteorológicas. Por ello, Lazcarro *et al.* (2020) advierten que, si bien la aplicación del software RClmDex permite conocer con detalle los indicadores climáticos para comprender mejor las consecuencias de la variabilidad del clima, se exceptúa un predominio de condiciones climáticas extremas, tal como ha sido el caso de este trabajo. Cabe mencionar que el municipio de Tlacuilotepec no cuenta con estación meteorológica, y el municipio de Zihuateutla no tenía suficientes datos para aplicar el software Rclimdex. Esto subraya la importancia de incrementar el número de estaciones meteorológicas, especialmente en regiones donde las sequías son recurrentes y la información climática es escasa (Lobato, 2016). Para abordar eficazmente las sequías, las autoridades locales, estatales y federales deben coordinarse para tratar las sequías como fenómenos continuos resultantes de cambios meteorológicos, gestión hidrológica y variabilidad económica y social. Además, políticas como los atlas de riesgos locales, estatales y tecnologías como los sistemas de riego podrían ayudar a prevenir y responder a los efectos negativos de las sequías (Robles, 2022).

Indicadores socioeconómicos

La población total del estado es de 6,583,278, ocupando el quinto lugar por número de habitantes a nivel nacional; siendo el municipio de Puebla el que concentra la mayor población (1,692,181), le siguen Tehuacán (327,312), San Martín Texmelucan (155,738), San Andrés Cholula (154,448), Atlixco (141,793), San Pedro Cholula (138,433), Cuautlancingo (137,435) y Amozoc (125,876) (INEGI, 2020; CONAPO, 2020), lo que implica una demanda alta del recurso hídrico.

El Índice de Marginación abarca características de distribución de la población, vivienda, educación e ingreso por trabajo. Por otra parte, el rezago educativo es la condición de una persona mayor de 15 años que no ha concluido su enseñanza básica, mientras que la pobreza analiza dos grandes enfoques: el de bienestar y el de derechos sociales. Estos factores se consideraron porque refieren al grado de sensibilidad y vulnerabilidad de la población a eventos extremos y de cambio climático.

No obstante, en la Figura 5, se evidencia que estos factores desfavorecen a municipios de las regiones del Norte, Nororiental, Mixteca y Sierra Negra que les restan capacidad adaptativa y aumentan su vulnerabilidad. Se observa que existen municipios donde las características socioeconómicas de marginación, rezago educativo y pobreza son factores relevantes en la sensibilidad del municipio a eventos de sequía. Para el caso de los municipios que han experimentado sequía extrema, se identificó que el municipio de Coyomeapan presenta un porcentaje alto en rezago y pobreza (44.9 y 48.7 respectivamente). Entre los municipios que mantienen un alto grado de marginación, así como un alto porcentaje en rezago se encuentran Piaxtla, Tulcingo. Otros municipios presentan un alto grado de marginación como son Ixtacamaxtitlán, Jonotla, Zihuateutla y Cuetzalan del Progreso;



Fuente: elaboración propia con datos de CONAPO y CONEVAL, 2023.

Figura 5. Frecuencia de sequía extrema y variables socioeconómicas.

mientras que entre aquellos que presentan un alto rezago educativo están Axutla, Albino Zertuche, Quecholac, Xicotlán, General Felipe Ángeles y Los Reyes de Juárez. Todo ello genera una restricción en el acceso a recursos y oportunidades, que aumentan la vulnerabilidad por sequía. González de la Rocha y Saraví (2018) y Toscana y Günther (2021) al respecto mencionan que la vulnerabilidad está en función no solo del déficit de precipitación, sino también de la demanda de agua de los sistemas y características de la población y las comunidades como la marginación, pobreza, rezago social e índice de desarrollo humano. En un

estudio realizado en el Estado de México, se encontró que los municipios con presencia de suelos con degradación y tendencia a la desertificación, junto con índices de marginación altos y con la modalidad de siembra temporal, son los que tienen mayor grado de vulnerabilidad (Espinosa *et al.*, 2022). En el marco de esta esperada transformación social es donde se ubicarían los esfuerzos institucionales, de organizaciones campesinas y de académicos que contribuyan a fortalecer las capacidades locales para afrontar desafíos tales como los que presenta una creciente tendencia a la sequía (Bocco *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

En cuanto a la exposición a los eventos de sequía, el análisis de las bases de datos del monitor de sequía de México reveló que en el estado de Puebla se han presentado sequías moderadas, severas y extremas; las primeras en todo el estado, mientras que las severas en 99% y las extremas en 12% de los municipios. Estas últimas de baja frecuencia se reportaron en los años 2003, 2011 y 2019. Puesto que las sequías varían en intensidad, duración y extensión, y con ello sus efectos son diversos, fue importante reconocer que la mayor parte del territorio poblano ha presentado alta frecuencia de sequías severas y moderadas, lo que implica una mayor planificación del uso de recursos a largo plazo. Respecto a los indicadores socioeconómicos de densidad de la población, índice de marginación, rezago educativo y pobreza, los municipios localizados en las regiones del Norte, Nororiental, Mixteca y Sierra Negra al tener grados altos, aumentan su sensibilidad y con ello adquieren mayor vulnerabilidad, entre los que destacan Coyomeapan, Piaxtla, Tulcingo, Ixtacamaxtitlán, Jonotla, Zihuateutla, Cuetzalan del Progreso, Axutla, Albino Zertuche, Quecholac, Xicotlán, General Felipe Ángeles y Los Reyes de Juárez. Es necesario una buena gestión de riesgo que fortalezca el afrontamiento de los problemas, desarrollando y construyendo resiliencia, por ello, las estrategias para enfrentar estos eventos serán diferentes en cuanto a la gestión de recursos y el fortalecimiento de su capacidad adaptativa haciendo frente al rezago en la capacidad socioeconómica e institucional. Para ello, son necesarios estudios a nivel local como el presente, que apoyen a mejorar la toma de decisiones de los actores clave.

Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por el apoyo otorgado en la realización de la presente investigación.

REFERENCIAS

- Bocco G, Orozco RQ, Álvarez LA, Solís B, Dobler MC. 2021. El estudio del impacto de la sequía en pequeñas comunidades rurales de México: Una revisión de la bibliografía; Universidad de Barcelona; Biblio 3W; 26; 1; 7-2021; 1-20. doi: <http://hdl.handle.net/11336/183254>.
- Calvo-Solano OD, Quesada-Hernández LE, Hidalgo H, Gotlieb Y. 2018. Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agronomía Mesoamericana*, 695-709. doi:10.15517/ma.v29i3.30828.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2012. Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2011. (1a. ed.). Ciudad de México. Recuperado de: <https://reliefweb.int/report/mexico/caracteristicas-e-impacto-socioeconomico-de-los-principales-desastres-ocurridos-en-la>.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2019. Estadísticas del agua en México 2019. Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México. Recuperado de: https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2023. Bases de datos de estaciones meteorológicas. recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). 2023. Pobreza por municipio. Recuperado de: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx>.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2020. Índices de marginación 2020. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>.
- Coronel A. 2013. Sequía: concepto e índices de monitoreo. Propuesta de un nuevo índice. *Revista Agromensajes*, 37(1). 1-3. Recuperado de: <https://fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/37/1AM37.pdf>
- Cortez-Villa J, Quevedo-Nolasco A, Arteaga-Ramírez R, Carrillo-Flores G. 2020. Tendencia de la sequía meteorológica en el estado de Durango, México, por el método de Rodionov. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1). 85-131. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-01-03>.
- Espinosa RLM, Alcántara MJA, Hernández JR. 2022. Vulnerabilidad agrícola por sequía: propuesta y validación metodológica para el estado de México. *Papeles de Geografía*, (66). <https://doi.org/10.6018/geografia.409401>.
- Felsche E, Ludwig R. 2021. Applying machine learning for drought prediction in a perfect model framework using data from a large ensemble of climate simulations, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(12). 3679–3691, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3679-2021>.
- González de la Rocha M, Saraví G. 2018. Pobreza y vulnerabilidad: debates y estudios contemporáneos en México. Ciudad de México: CIESAS.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2016. Vulnerabilidad al cambio climático. Recuperado de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/vulnerabilidad-al-cambio-climatico-80125>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2020. Censo de Población y Vivienda 2020, Puebla. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_pue.pdf.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Summary for Policymakers. *In: Parry ML, Canziani OE, Palutikof JP, Van der Linden PJ, Hanson CE (eds), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 7–22. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg2/>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2012a. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner GK, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Cambio climático 2013: bases físicas. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Synthesis Report: Summary for Policymakers. (R. K. Core Writing Team, Pachauri, Meyer LA, Eds.). Ginebra, Suiza: IPCC. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Calentamiento global de 1.5°C. [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T (eds)]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. pp: 1-34.
- Lazcarro MC, Tristán AC, Belitskaya VD, Ovalle AC, Putri RF. 2020. Comparison of two climate methodologies on Lerma Chapala basin: moving mean and climate variability indices with RCLimDex. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 451(1). p. 012023. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/451/1/012023
- Lobato-Sánchez R, Altamirano del Carmen MÁ, Hoyos Reyes C, López Pérez M, Salas Salinas MA, Rosario de la Cruz JG. 2019. Procedimiento metodológico para la elaboración de un monitor de la persistencia de la sequía en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(1). 146-176. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-06>.
- Lobato-Sánchez R. 2016. El monitor de la sequía en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5). 197-211. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500197&lng=es&tlng=es.
- Matailo-Ramírez LM, Luna-Romero ÁE, Alava ARC, Jaramillo FYV. 2019. Sequías: Efecto sobre los recursos naturales y el desarrollo sostenible. *Agroecosistemas*, 7(3). 154-162. Recuperado de: <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/331>.
- Méndez M. 2013. Diagnóstico y Pronóstico de Sequía en México. (informe OMM / MOMET-043). México: Comisión Nacional del Agua y Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de: <https://sites.google.com/a/wmo.int/mx/infosmomet/mometyear/2013>.
- Mishra AK, Singh VP. 2010. A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2). 202-216. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- Monitor de Sequía de México (MSN). 2023. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Nandgude N, Singh TP, Nandgude S, Tiwari M. 2023. Drought Prediction: A Comprehensive Review of Different Drought Prediction Models and Adopted Technologies. *Sustainability*, 15(15). 11684. <https://doi.org/10.3390/su151511684>.
- NIDIS. 2007. The National Integrated Drought Information System implementation plan: A pathway for national resilience. Recuperado de: <https://www.drought.gov/documents/national-integrated-drought-information-system-implementation-plan>.
- Núñez Cobo J, Verbist K. 2018. Atlas de sequías de América Latina y el Caribe. UNESCO y CAZALAC.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2019. Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por Sequía grave o desertificación, en particular en África. Recuperado de: <https://knowledge.unccd.int/knowledge-products-and-pillars/unccd-science-policy-blog>.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 1992. La Conferencia Mundial sobre el Clima. En Boletín de la OMM, XXVIII. N° 3. Ginebra, Suiza.
- PECC (Programa Especial de Cambio Climático 2014-208). 2014. Recuperado de: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342492&fecha=28/04/2014.
- Robles CJE. 2022. Asignación de recursos de respuesta a sequías y su impacto sesgado en la producción Agrícola Mexicana. *Sobre México Temas De Economía*, 1(6). 40-80. <https://doi.org/10.48102/rsm.v1i6.111>.
- Ruiz-Álvarez O, Singh VP, Enciso-Medina J, Ontiveros-Capurata RE, dos Santos CAC. 2020. Observed trends in daily temperature extreme indices in Aguascalientes, Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 142. 1425-1445. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03391-1>.
- Toscana-Aparicio, A, Günther MG. 2021. La sequía de 2019 en localidades cañeras del norte de Oaxaca. Vulnerabilidad, prevención, adaptación y mitigación. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 31(57). <https://doi.org/10.24836/es.v31i57.1076>.
- USDM (U. S. Drought Monitor). 2023. Monitor de Sequía de los Estados Unidos de América. Recuperado de: <http://droughtmonitor.unl.edu>.
- Varela Ledesma N, Oquendo Ferrer HM, Romero Suárez PL. 2020. Gestión del riesgo por sequía hacia un enfoque integral. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(4). 377-382. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v12n6/2218-3620-rus-12-06-380.pdf>.
- Velasco Hernández MDLÁ, Morales Acoltzi T, Estrella Chulim NG, Díaz Ramos R, Juárez Sánchez JP, Hernández Vázquez M, Bernal Morales R. 2015. Tendencias y variabilidad de índices de cambio climático: enfoque agrícola en dos regiones de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7). 1587-1599. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n7/v6n7a13.pdf>.

- Willhite DA, Glantz MH. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10(3). 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>.
- Zarafshani K, Sharafi L, Azadi H, Van Passel S. 2016. Modelos de evaluación de vulnerabilidad a la sequía: hacia un marco conceptual. *Sostenibilidad*, 8(6). 588. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su8060588>.