DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Artículos

Evaluación del riesgo por sequía hidrológica en áreas urbanas de México: Guadalajara y Monterrey

Hydrological drought risk assessment in urban areas of Mexico: Guadalajara and Monterrey

Heidy Viviana Castellano-Bahena[1], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1387-516X

David Ortega-Gaucin[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5336-7442

[1]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, heidy.castellano@posgrado.imta.edu.mx

[2]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, dortega@tlaloc.imta.mx

Autora para correspondencia: Heidy Viviana Castellano-Bahena, heidy.castellano@posgrado.imta.edu.mx

Resumen

A pesar de su importancia, existe relativamente poca investigación centrada en el riesgo por sequía en las ciudades. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo proponer una metodología para la evaluación del riesgo por sequía hidrológica en áreas urbanas de México y sus

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

respectivos organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento (OOAPAS). Esta metodología se aplicó en dos de las zonas urbanas más importantes del país: el área hidropolitana de Monterrey (AHM), y el área metropolitana de Guadalajara (AMG). El periodo de estudio fue de 2008-2018. Para la evaluación del riesgo se adoptó el enfoque contextual, que define este concepto en función de la amenaza, exposición y vulnerabilidad del sistema analizado. Para el cálculo de la amenaza se utilizó el índice de sequía de los caudales fluviales (SDI-12), y para la evaluación de la vulnerabilidad y la exposición se emplearon indicadores socioeconómicos, ambientales y de gestión institucional. Los resultados indican que las áreas de estudio son muy sensibles a las sequías hidrológicas, es decir, al déficit de escurrimientos superficiales que ingresan a sus fuentes de abastecimiento de agua. La tendencia del índice de vulnerabilidad en estas áreas va a la baja. Con respecto al índice de exposición y riesgo por sequía, la tendencia es ir en aumento en ambas áreas. Los resultados obtenidos demostraron que la metodología propuesta es factible y útil en la evaluación del riesgo por sequía en las áreas de estudio, y puede ser aplicada en otras zonas urbanas del país.

Palabra clave: sequía hidrológica, agua potable, ciudades, vulnerabilidad, exposición, capacidad de adaptación, Guadalajara, Monterrey.

Abstract

Despite its importance, there is relatively little research focused on drought risk in cities. Therefore, the present work aims to propose a methodology for the evaluation of hydrological drought risk in urban areas

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

of Mexico and their respective drinking water, sewerage and sanitation operating organizations (OOAPAS, by its Spanish acronym). This methodology was applied in two of the most important urban areas of the country: The Monterrey hydropolitan area (AHM), and the Guadalajara metropolitan area (AMG). The study period was 2008-2018. For the risk assessment, the contextual approach was adopted, which defines this concept based on the hazard, exposure and vulnerability of the analyzed system. To calculate the hazard, the Streamflow Drought Index (SDI-12) was used, and socioeconomic, environmental, and institutional management indicators were used to assess vulnerability and exposure. The results indicate that the study areas are very sensitive to hydrological droughts, that is, to the deficit of surface runoff that enters their sources of water supply. The vulnerability index trend in these areas is downward. Regarding the drought exposure and risk index, the trend is to increase in both areas. The results obtained showed that the proposed methodology is feasible and useful in assessing of drought risk in the study areas, and can be applied in other urban areas of the country.

Keyword: Hydrological drought, drinking water, cities, vulnerability, exposure, adaptive capacity, Guadalajara, Monterrey.

Recibido: 20/12/2022

Aceptado: 01/10/2023

Publicado Online: 19/10/2023

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Introducción

En las últimas décadas, México ha enfrentado severos episodios de sequía, con impactos negativos en los distintos sectores socioeconómicos (Conagua, 2014; Esparza, 2014; Torres-Lima, 2015; Breña-Naranjo, 2021). Debido al gran crecimiento de la población en las áreas urbanas, éstas son cada vez más sensibles a las sequías hidrológicas, las cuales se producen cuando el déficit de precipitación en las cuencas de aportación se prolonga en el tiempo, y se combina con las presiones antrópicas de demanda de aguas superficiales y subterráneas, provocando una reducción considerable en el suministro de las fuentes de abastecimiento (ríos, lagos, manantiales, embalses y acuíferos). Por ello, algunas ciudades requieren constantemente nuevas fuentes de agua y desarrollo de infraestructura hidráulica, sobre todo aquéllas que padecen escasez crónica del vital líquido (donde la demanda del recurso supera a la oferta), como la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey (García, Benítez, & Gaudiano, 2012; Torres & Barajas, 2013; Aguilar-Barajas, Sisto, & Ramírez, 2015; FAMM, 2018). Así, las urbes se enfrentan a reducciones recurrentes en el agua disponible ocasionadas por las frecuentes sequías, cuyos efectos se ven exacerbados por la gestión inadecuada del recurso hídrico y el enorme crecimiento urbano (Pineda-Pablos & Salazar-Adams, 2016).

La atención al fenómeno de las sequías en las últimas décadas se ha basado en un enfoque reactivo y no en la gestión del riesgo (Ortega-Gaucin & Velasco, 2013). Las evaluaciones de riesgo por sequía constituyen el primer paso para identificar las causas que generan los impactos y, de esta manera, facilitar el cambio de paradigma para la

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

puesta en práctica de las medidas de prevención y mitigación (Knutson, Hayes, & Philips, 1998). Al respecto, se han realizado diversos estudios que proponen cómo medir el riesgo por sequía. De manera resumida, se puede citar el trabajo de Blauhut (2020), que hace una revisión de 82 artículos a nivel internacional relacionados con el riesgo por sequía, además de otros 26 artículos que se consultaron sobre el mismo tema, los cuales se recopilan en el trabajo de Castellano-Bahena y Ortega-Gaucin (2022). Así, el total de artículos revisados fueron 108 del periodo 2001-2021, donde se observa que el 67 % se trata de trabajos relacionados con agricultura; el 25 %, con múltiples amenazas; solo el 2 % con sequía hidrológica, y el 6 % restante con temas asociados con la silvicultura, energía eléctrica, estrés por déficit hídrico y salud (Castellano-Bahena & Ortega-Gaucin, 2022). A pesar del número creciente de estos estudios, se observó que existe muy poca investigación respecto a las metodologías de riesgo urbano por sequía; de los trabajos revisados, solo en cinco de ellos se encontró involucrada el área urbana de manera indirecta y son los trabajos elaborados por Welle y Birkmann (2015); Neri y Magaña (2016); Sena, Ebi, Freitas, Corvalan y Barcellos (2017); Ortega-Gaucin, De-la-Cruz-Bartolón y Castellano-Bahena (2018), y Ahmadalipour, Moradkhani, Castelletti y Magliocca (2019).

Por lo tanto, tomando en cuenta las áreas de oportunidad y los vacíos de conocimientos detectados sobre el tema en cuestión, en este trabajo se desarrolló una metodología para evaluar el riesgo por sequía hidrológica en áreas urbanas de México. Las áreas de estudio donde se aplicó esta metodología fueron las siguientes: área hidropolitana de Monterrey (AHM), y área metropolitana de Guadalajara (AMG), incluyendo sus respectivos organismos operadores de agua potable,

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

alcantarillado y saneamiento (OOAPAS), es decir, los Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), y el Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Guadalajara (SIAPA). El riesgo por sequía en estas áreas de estudio se evaluó mediante la determinación de índices de riesgo que se calcularon a partir de la combinación de índices de amenaza, exposición y vulnerabilidad a la sequía, tal como se describe en el siguiente apartado.

Materiales y métodos

Áreas de estudio

AHM

El área metropolitana de Monterrey comprende 13 municipios; la región "hidropolitana" se trata de un conjunto de relaciones geopolíticas y de poder, moldeadas históricamente por un ideal de desarrollo y modernización que ubica a las ciudades como espacios prioritarios en la satisfacción de necesidades básicas, es decir, servicios de agua potable, saneamiento y energía eléctrica (Perló & González, 2005). Por otro lado, ese conjunto de relaciones de poder político tiene manifestaciones concretas en la producción del espacio urbano (Raffestin, 1993). SADM delimitó el área hidropolitana a nueve municipos: Monterrey, Apodaca, García, San Pedro Garza García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, San Nicolás de los Garza y Santa Catarina (Conagua, 2015c) (Figura 1a). SADM presta los servicios de agua potable, drenaje sanitario y saneamiento al AHM (Conagua, 2015a). El abastecimiento de agua

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

potable al AHM proviene de un 68 % de fuentes superficiales, que se componen de tres presas: La Boca, Cerro Prieto y El Cuchillo; el 32 % restante proviene de aguas subterráneas (Semarnat, 2011; Ortega-Gaucin, 2012; Torres & Barajas, 2013; FAMM, 2018) (Figura 1b y 1c).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

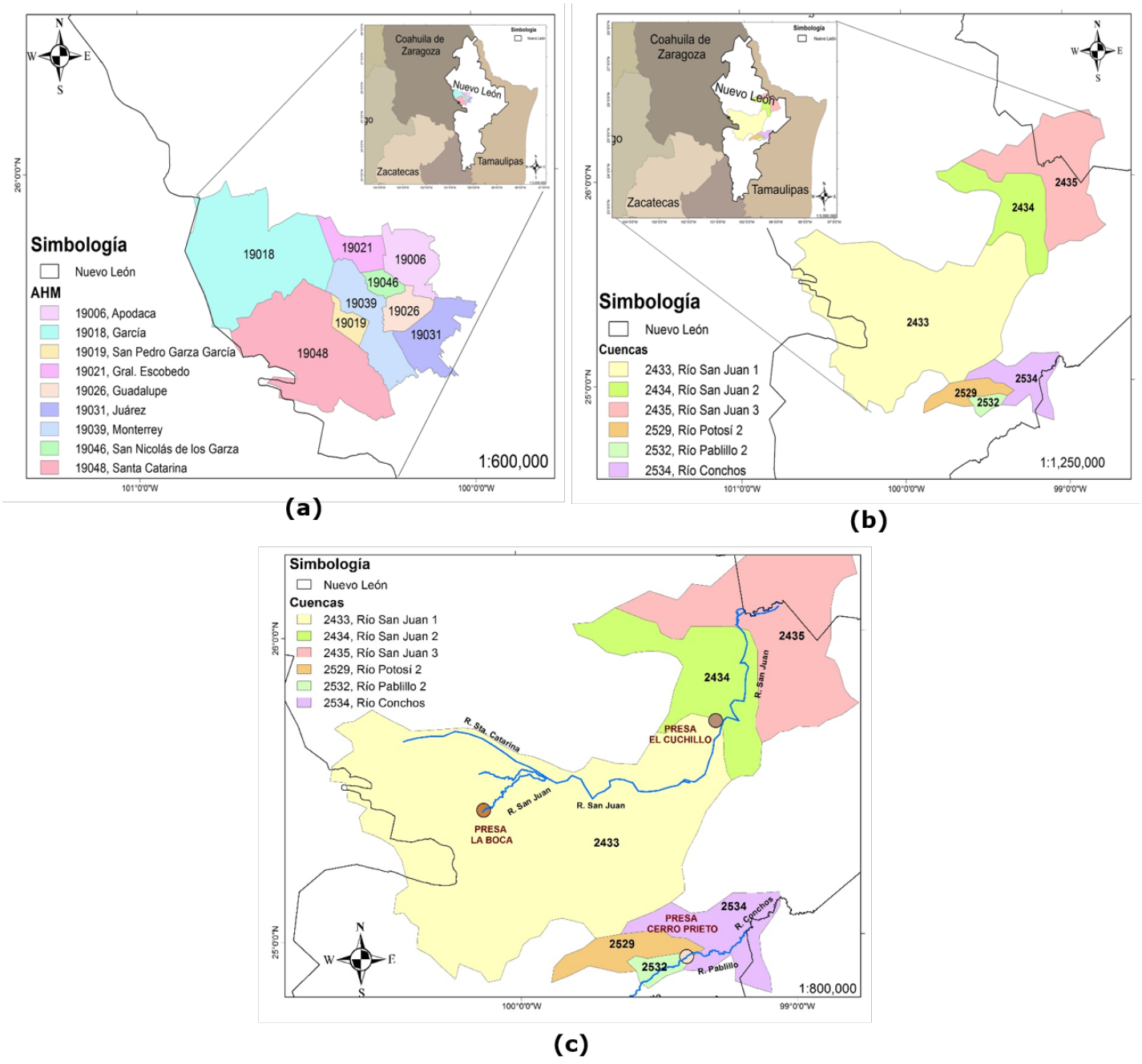


Figura 1. Área de estudio AHM: (a) municipios que integran el AHM; (b) cuencas donde se encuentran las fuentes de agua superficial; (c) fuentes de abastecimiento superficiales.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

El AHM se encuentra en una zona semiárida, según la clasificación climática de Köppen, y por ende se enfrenta a una baja disponibilidad natural de recursos hídricos. El comportamiento histórico de las lluvias en el AHM y zonas aledañas presentan un alto grado de variabilidad interanual, donde se observan lluvias inferiores al promedio (622 mm) y ocasionalmente se han presentado lluvias relativamente abundantes, incluso superiores a los 1 000 mm (Aguilar-Barajas *et al*., 2015). Se realizó un análisis del comportamiento histórico de las lluvias en la región de estudio y se observó que en el periodo de 1980-2018 ocurrieron 11 años con lluvias por debajo de la media (28.1 %); el año más seco en este periodo fue 2011, con un déficit de precipitación de 25.28 % con respecto a la media; el año más lluvioso fue 2010 con 1 331 mm.

AMG

El AMG está integrada por nueve municipios de acuerdo con el decreto del gobierno del estado de Jalisco, denominado Decreto 25400 (Gobierno del Estado de Jalisco, 2015). Sin embargo, para efectos de la prestación de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento por parte del SIAPA, existe un convenio para prestar estos servicios solamente a los municipios de Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque y Tonalá (Decreto 24805/LX/13) (Gobierno del Estado de Jalisco, 2013). Por tanto, solo se consideró a estos municipios (Figura 2a), como el área de estudio para este proyecto. El origen del suministro al AMG para el uso público-urbano proviene del lago de Chapala, la presa Calderón y el conjunto de sistemas de pozos profundos (Conagua, 2009a) (Figura 2b y 2c).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

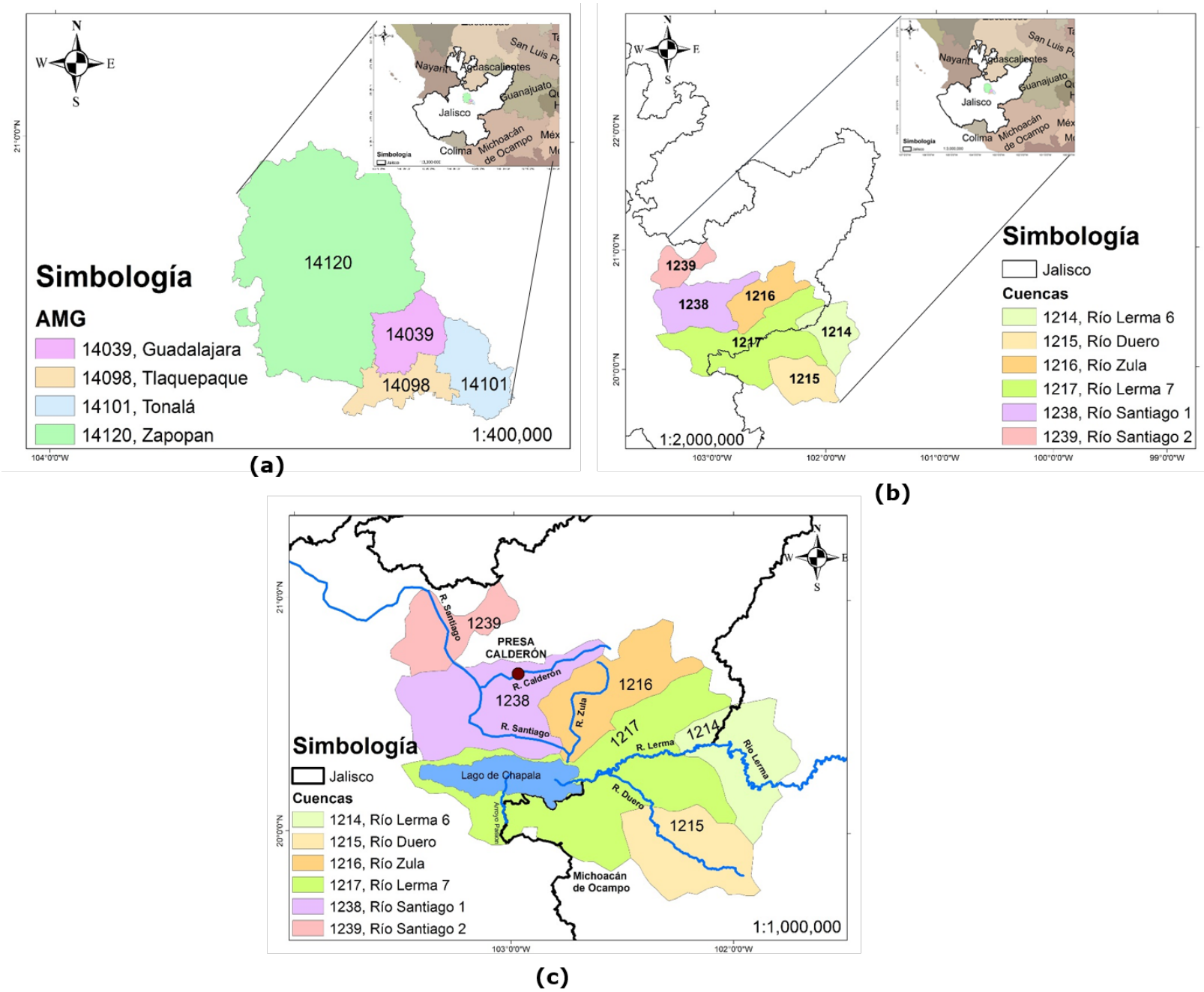


Figura 2. Área de estudio AMG: (a) municipios que integran el convenio con el SIAPA; (b) cuencas donde se encuentran las fuentes de agua superficial; (c) fuentes de abastecimiento superficiales.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

El 68 % del territorio del estado de Jalisco presenta clima cálido subhúmedo a lo largo de la costa y zona centro; 18 %, templado subhúmedo en las partes altas de las sierras; y 14 % seco y semiseco en el norte y noreste del estado (INEGI, 2013). La precipitación media anual del AMG es de 865 mm, superior en 12 % a la media nacional, que es de 772 mm (Conagua, 2009a). Se hizo un análisis del comportamiento histórico de las lluvias en la región de estudio y se observó que en el periodo de 1980-2018 ocurrieron 20 años con lluvias por debajo de la media (51.3 %); el año más seco en este periodo fue 2011, con un déficit de precipitación de 45.6 % con respecto a la media; el año más lluvioso fue en 1992 con 1 122 mm.

Evaluación del riesgo por sequía hidrológica

El riesgo, en general, se define como la consecuencia anticipada del evento adverso. Más específicamente, en el área científica de los peligros naturales, el riesgo puede definirse como una amenaza real o existente para un sistema (vida, salud, propiedad, infraestructura, economía y medio ambiente), dada su exposición y vulnerabilidad presentes (Tsakiris, 2007). La evaluación del riesgo se puede calcular mediante la siguiente formulación general (UNDRO, 1979; IPCC, 2014):

$$Riesgo = f(amenaza * exposición * vulnerabilidad) \quad (1)$$

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

En el caso específico de la sequía, la amenaza se evalúa por lo común con información climática o hidrológica histórica que se utiliza para determinar su probabilidad de ocurrencia (Ortega-Gaucin, Ceballos-Tavares, Ordoñez, & Castellano-Bahena, 2021). En este caso, dado que las principales fuentes de abastecimiento de agua en las ciudades analizadas son ríos, lagos y presas de almacenamiento, la amenaza se determina mediante índices de sequía hidrológica (específicamente, mediante el índice de sequía de los caudales fluviales, SDI); la evaluación de la exposición y vulnerabilidad se efectúa mediante indicadores socioeconómicos y ambientales que permiten comprender las diferentes dimensiones de estas variables, lo cual es muy útil para la toma de decisiones orientadas a la gestión del riesgo (Castellano-Bahena & Ortega-Gaucin, 2022).

Sin embargo, Khoshnazar, Corzo y Diaz (2021) comentan que el cálculo tradicional del índice de riesgo mediante la multiplicación de los índices de amenaza, exposición y vulnerabilidad (tal como se describió en la Ecuación (1)) presenta una desventaja, y es que cuando los valores de cada uno de los componentes son altos, el resultado debiera ser alto también, pero al realizar la operación, el valor del índice de riesgo resulta ser bajo, lo cual no parece razonable. Para superar esta limitación se han propuesto diferentes metodologías de integración de los componentes del riesgo. Estas metodologías incluyen análisis de componentes principales, métodos de ponderación y métodos de agregación (MacKenzie, 2014; Nardo *et al*., 2005). En este trabajo se empleó el método de agregación geométrica debido a que facilita la interpretación de los resultados y el análisis de la ordenación final de las unidades analizadas, y admite un menor grado de compensación entre los indicadores (Blancas-Peral,

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Contreras-Rubio, & Ramírez-Hurtado, 2011). La fórmula es la siguiente (Bas-Cerda, 2014):

$$IC_c = \prod_{q=1}^{Q}(I_{qc})^{W_q} \quad (2)$$

Donde:

IC_c = agregación geométrica

w_q = peso del indicador

I_{qc} = valor normalizado de la unidad de análisis *c* con respecto al indicador *q*, para *q* = 1,..., *Q*, y *c* = 1,..., *M.*

Khoshnazar *et al*. (2021) modificaron la Ecuación (2) para calcular el índice de riesgo como:

$$IRS = (\prod_{1}^{n} I_i)^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{I_1 I_2 \dots I_n} \quad (3)$$

Donde:

IRS = índice de riesgo por sequía

I_i = *i*-ésimo componente (índice) que contribuye al índice de riesgo

n = número total de componentes

De acuerdo con lo anteriormente descrito, la Ecuación (1) se modifica a:

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

$$IRS = IA * IE * IV \quad (4)$$

Donde:

IRS = índice de riesgo por sequía

IA = índice de amenaza

IE = índice de exposición

IV = índice de vulnerabilidad

En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo propuesto para la evaluación de los componentes del riesgo por sequía en las áreas de estudio (AHM y AMG). El análisis de la amenaza se basa en el análisis de la severidad de la sequía hidrológica y su probabilidad de ocurrencia, para lo cual se tomaron en cuenta los registros de escurrimientos de los principales ríos que abastecen a las fuentes de abastecimiento (presas y lagos) de las ciudades analizadas durante los últimos 38 años (1980-2018). La exposición y vulnerabilidad se calcularon a partir de indicadores socioeconómicos, ambientales y de gestión institucional durante el periodo 2008-2018. En los siguientes puntos se describe a detalle cada etapa de la metodología.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

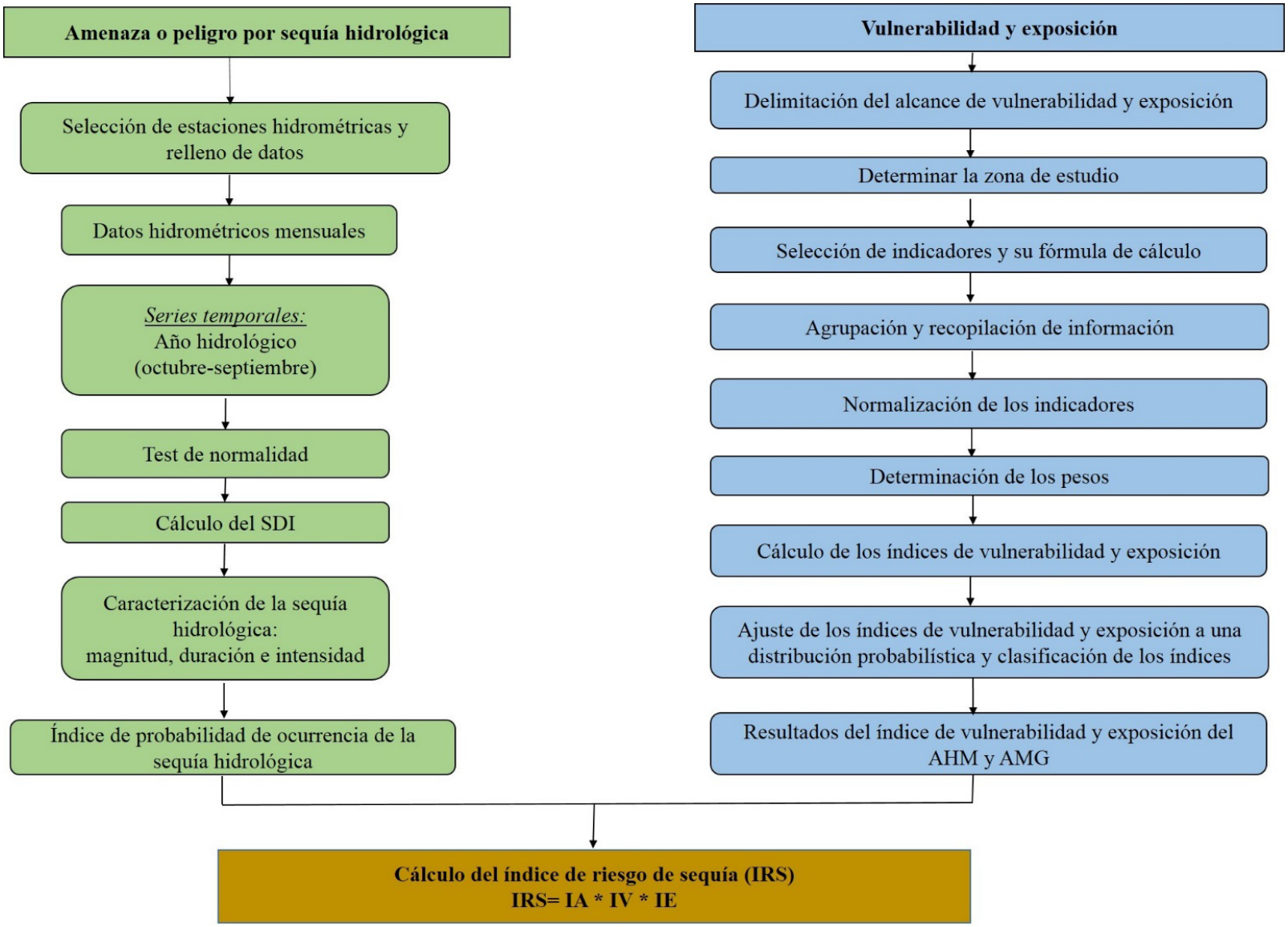


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología para evaluar el riesgo por sequía en las áreas urbanas bajo estudio.

Índice de amenaza o peligro por sequía (IA)

El procedimiento para la determinación del índice de amenaza o peligro por sequía involucra las siguientes actividades:

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

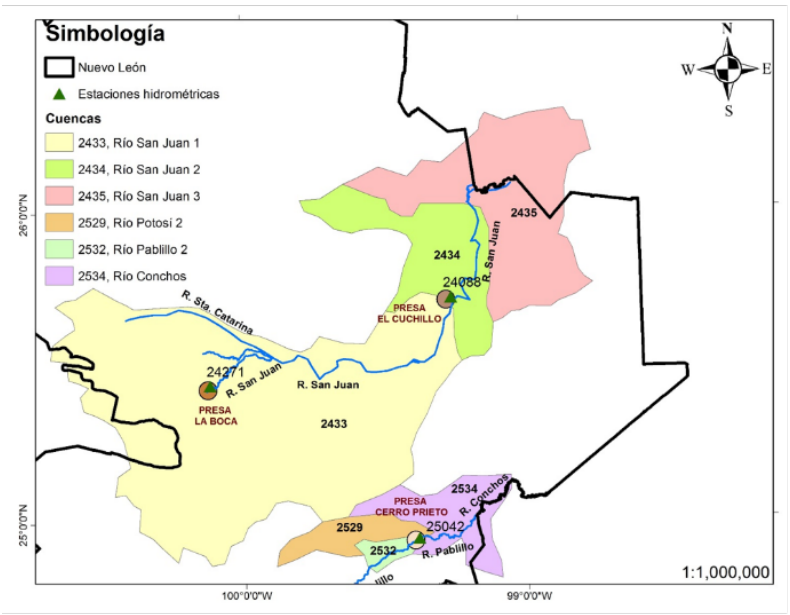
a) Selección de estaciones hidrométricas y relleno de datos faltantes

La selección de estaciones hidrométricas estuvo sujeta a la disponibilidad de información de los datos hidrométricos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Se seleccionaron las estaciones que tuvieron más del 80 % de datos diarios en el periodo de registro. Para rellenar los datos faltantes, se completaron con el promedio de las estaciones hidrométricas convencionales cercanas a la estación hidrométrica seleccionada mediante el método de la ponderación en función inversa de la distancia (IDW) (Wise, 2000). El IDW está disponible en los programas de sistemas de información geográfica (SIG) (Pérez & Mas, 2009). Los datos se tomaron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas), el periodo de registro de los datos fue de 1980 a 2018. Así, para el AHM se seleccionaron tres estaciones: 24271-La Boca, 24088-El Cuchillo y 25042-Cerro Prieto (Figura 4a). En el caso del AMG, se seleccionaron cuatro estaciones: 12396-Camécuaro, 12526-Yurécuaro II, 12935-Calderón y 12937-Zula (Figura 4b).

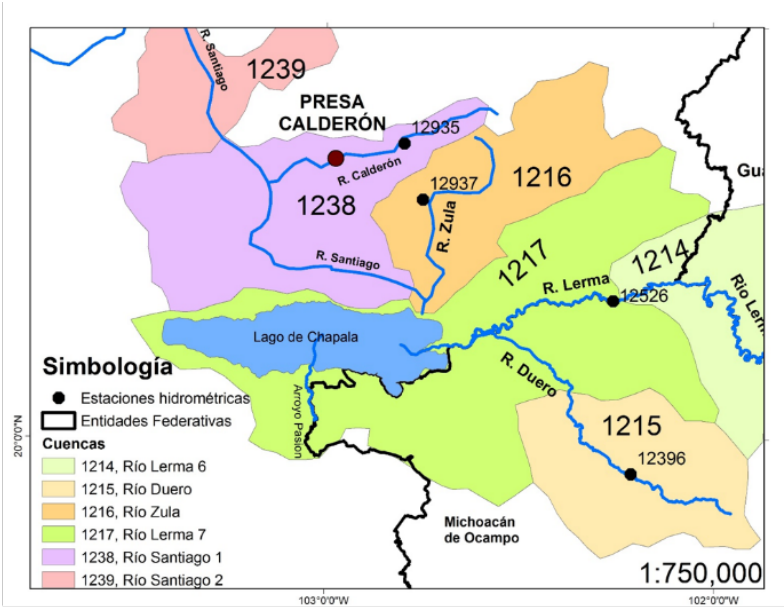
2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates



(a)



(b)

Figura 3. Estaciones hidrométricas seleccionadas: (a) AHM y (b) AMG.

b) Obtención de datos hidrométricos mensuales y series temporales

Los datos originales de caudal diario en m^3/s se agregaron a volúmenes mensuales; luego se agruparon de acuerdo con el año hidrológico de 12 meses (octubre-septiembre) por un periodo de 38 años (445 meses) entre 1980-2018; posteriormente a estas series temporales se les aplicó el test de normalidad.

c) Test de normalidad

La función de distribución de probabilidades (FDP) de caudales suele estar sesgada y, por lo tanto, puede requerir normalización mediante el uso de

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

distribuciones como la Gamma o Log-normal (Batelis & Nalbantis, 2014). En este trabajo, los datos del año hidrológico se normalizaron utilizando las FDP mencionadas, y posteriormente se les aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) para seleccionar la que mejor se ajustaba a los datos. Los resultados de la prueba mostraron que la distribución Gamma se ajusta bien en el 100 % de la escala de tiempo evaluada (octubre-septiembre), por lo cual se decidió utilizarla.

d) Cálculo del índice de sequía de los caudales fluviales (SDI)

Para caracterizar la sequía hidrológica, Nalbantis y Tsakiris (2009) desarrollaron el SDI considerando el valor del caudal mensual ($Q_{i,j}$), donde i es el año hidrológico y j es el mes dentro de ese año hidrológico. Con base en esta serie se obtiene:

$$V_{i,k} = \sum_{J=1}^{3k} Q_{i,j}\ ;\ i = 1,2,3,\dots, j = 1,2,3,\dots,12, k = 1,2,3,4 \qquad (5)$$

Donde:

$V_{i,k}$ = volumen de caudal acumulado para el i-ésimo año hidrológico y el k-ésimo periodo de referencia

Para tres meses del SDI, el valor de k = 1, de manera similar k = 2, k = 3 y k = 4 para 6, 9 y 12 meses, respectivamente. El SDI se define en función de los volúmenes de caudal acumulados $V_{i,k}$ para cada periodo de referencia k del i-ésimo año hidrológico de la siguiente manera:

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k};\ i = 1,2,\ldots\ k = 1,2,3,4 \quad (6)$$

Donde:

$\bar{V}_k$ = media de los volúmenes acumulados de caudal del periodo de referencia k, ya que se estiman durante un periodo prolongado de tiempo

S_k = desviación estándar de los volúmenes acumulados de caudal del periodo de referencia *k*, ya que se estiman durante un periodo prolongado de tiempo

En esta definición, el nivel de truncamiento se establece en $\bar{V}_k$, aunque se podrían usar otros valores (Nalbantis, 2008; Nalbantis & Tsakiris, 2009).

Según los creadores del índice, se pueden definir diferentes estados o grados de sequía hidrológica utilizando los resultados obtenidos del cálculo del SDI en cada periodo de tiempo (Tabla 1).

Tabla 1. Definición de estados de sequía hidrológica con base en el SDI.

Estado	Descripción	Criterio
0	No hay sequía	SDI mayor a 0.0
1	Sequía leve	-1.0 ≤ SDI <0.0
2	Sequía moderada	-1.5 ≤ SDI <-1.0
3	Sequía severa	-2.0 ≤ SDI <-1.5
4	Sequía extrema	SDI <-2.0

Fuente: Nalbantis y Tsakiris (2009).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Para calcular el SDI se utilizó el *software* DrinC®. Este *software* tiene como objetivo evaluar los índices de sequía adecuada para el análisis meteorológico, hidrológico y de sequía agrícola. El *software* es de fácil manejo. La base de referencia principal en DrinC es el año hidrológico (octubre-septiembre) (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2015). Para este trabajo y de acuerdo con los resultados de la prueba de KS, se utilizó la distribución Gamma. Por último, se calculó su probabilidad de ocurrencia mediante la obtención de una frecuencia relativa (Malik, Kumar, Salih, & Yaseen, 2021), como se indica enseguida.

e) Cálculo del índice de amenaza o peligro por sequía hidrológica

Este índice se determinó mediante la probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía hidrológica (moderada, severa y extrema) en el AHM y AMG de la siguiente forma:

$$IA = \frac{MS}{TMS} \tag{7}$$

Donde:

IA = índice de amenaza o peligro por sequía hidrológica

MS = número de meses del evento de sequía (en este caso se consideró la sequía leve moderada, severa y extrema)

TMS = número total de meses (con y sin sequía)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Índices de vulnerabilidad y exposición (IV e IE)

Los conceptos de vulnerabilidad y exposición que se aplican en este trabajo son los propuestos por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014). En el caso de la vulnerabilidad, ésta se define como la propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño, y la falta de capacidad de respuesta y adaptación. La fórmula usada en este estudio se presenta a continuación:

$$Vulnerabilidad = f(sensibilidad - capacidad\ de\ adaptación) \quad (8)$$

La sensibilidad o susceptibilidad al daño es el grado en que un sistema se ve afectado, ya sea de manera adversa o beneficiosa, por estímulos del cambio climático (IPCC, 2001; IPCC, 2014). La capacidad de adaptación se define como el proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. Según el IPCC (2001), las principales características que determinan la capacidad de adaptación de una región o comunidad incluyen la posesión de riqueza económica, tecnología, información, conocimientos, infraestructura, instituciones y equidad.

Además de los conceptos anteriores, en este trabajo se consideran tres tipos básicos de vulnerabilidad: socioeconómica, de gestión institucional y ambiental, que en su conjunto dan origen a la vulnerabilidad general (Figura 5).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

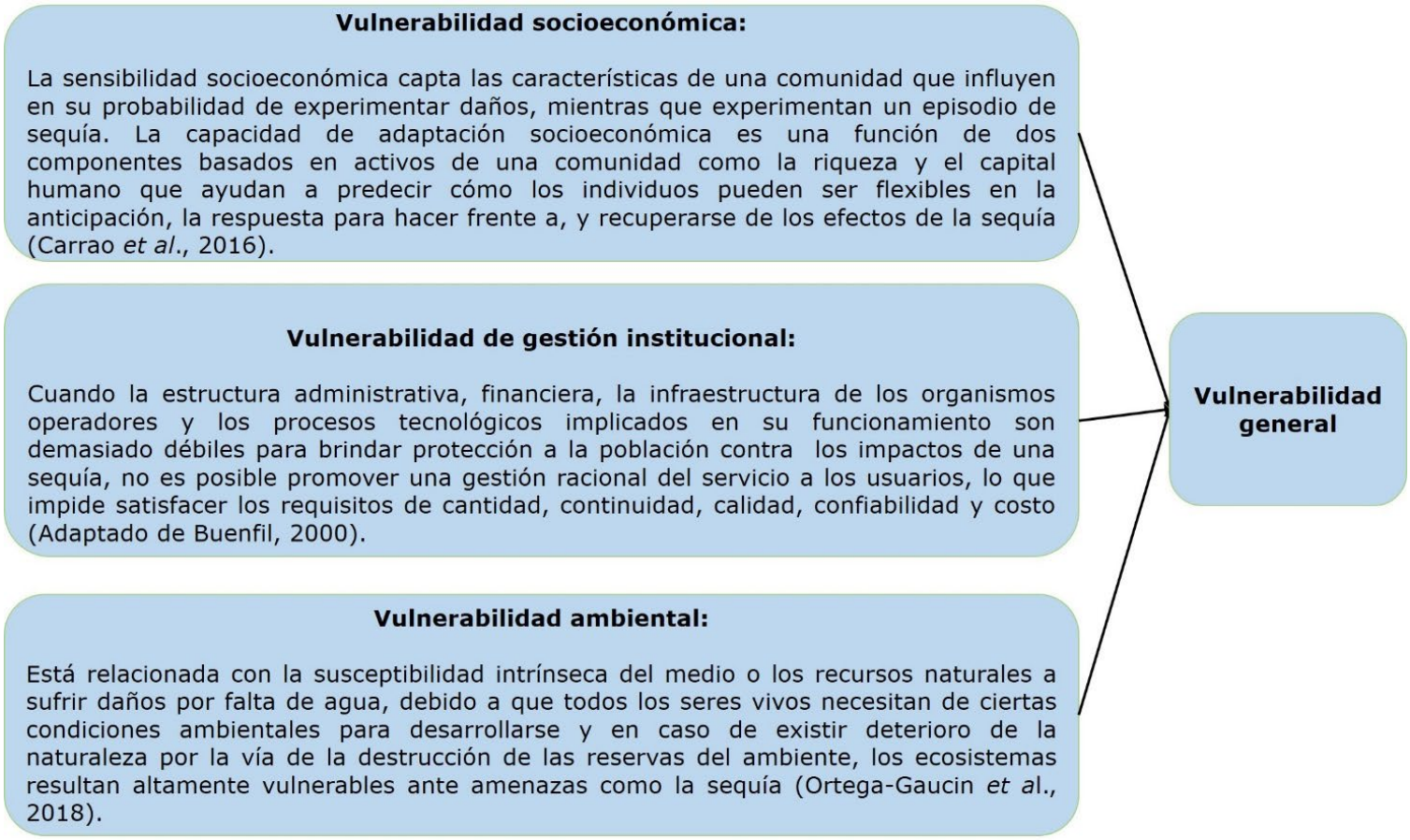


Figura 4. Tipos de vulnerabilidad analizados en esta investigación.

Las fórmulas usadas para calcular los índices de vulnerabilidad socioeconómica (IVSE), de gestión institucional (IVGI) y ambiental (IVA) son las siguientes:

$$IVSE = ISSE - ICASE \quad (9)$$

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$IVGI = ISEGI - ICAGI \quad (10)$$

$$IVA = ISEA - ICAA \quad (11)$$

Donde:

ISSE = índice de sensibilidad socioeconómica

ICASE = índice de capacidad de adaptación socioeconómica

ISEGI = índice de sensibilidad de gestión institucional

ICAGI = índice de capacidad de adaptación de gestión institucional

ISEA = índice de sensibilidad ambiental

ICAA = índice de capacidad de adaptación ambiental

A partir de los índices anteriores se determina el índice de vulnerabilidad general (*IVG*) mediante:

$$IVG = IVSE + IVGI + IVA \quad (12)$$

Por otro lado, con respecto a la exposición, el IPCC (2014) la define como la presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente. Aquí se propone la siguiente fórmula para calcular el índice de exposición general (*IEG*):

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

$$IEG = IESE + IEGI + IEA \quad (13)$$

Donde:

IESE = índice de exposición socioeconómica

IEGI = índice de exposición de gestión institucional

IEA = índice de exposición ambiental

El procedimiento para la construcción de los índices de vulnerabilidad y exposición consta de nueve pasos, los cuales se describen a continuación:

1. Delimitación del alcance del análisis de vulnerabilidad y exposición

Para establecer la problemática de la vulnerabilidad, Füssel (2004) propone que se formulen las interrogantes que se muestran en la Figura 6, que para el caso de esta investigación allí mismo se responden.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

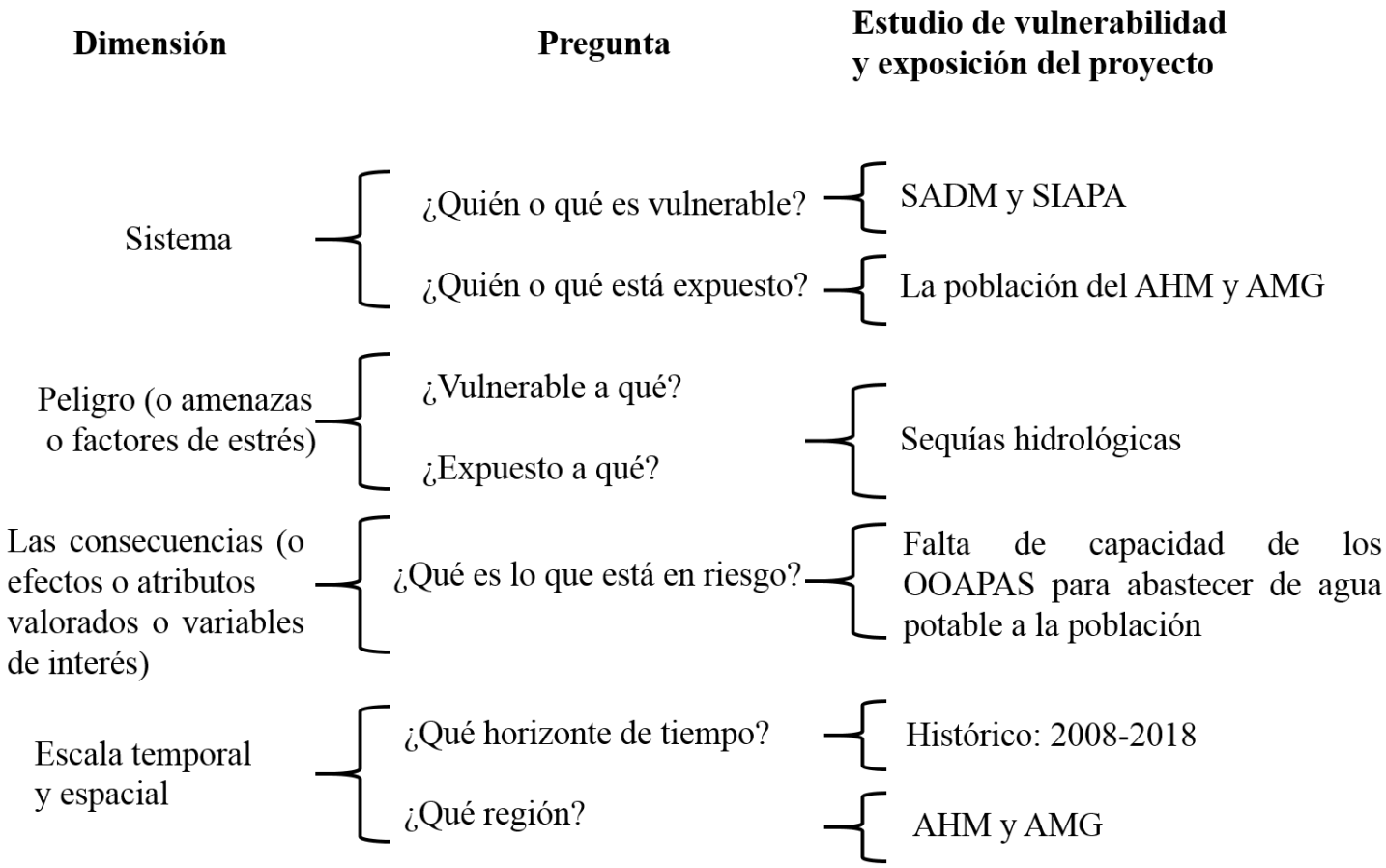


Figura 5. Dimensiones fundamentales que describen una situación de vulnerabilidad y exposición. Fuente: elaboración propia a partir de Füssel (2004).

2. Selección de indicadores y fórmulas para su cálculo

El cálculo de los índices descritos anteriormente se basa en indicadores socioeconómicos, ambientales y de gestión institucional. Para la selección de indicadores de este proyecto se consultaron 24 artículos relacionados con el cambio climático y sequías a nivel nacional e internacional del periodo 2003-2019. Se analizaron los indicadores de estos artículos y se

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

seleccionó una batería de 29 indicadores. Los indicadores seleccionados se basaron en los siguientes criterios: a) relación de la variable con la sequía, b) disponibilidad de información y c) que exista información histórica de los datos (2008-2018). Posteriormente, los 29 indicadores fueron consultados con el juicio de expertos del SADM y SIAPA, y finalmente se eligieron 16 indicadores para realizar la evaluación de la vulnerabilidad y exposición a la sequía en los sectores socioeconómico, ambiental y gestión institucional; estos indicadores se presentan en la Tabla 2. Asimismo, en la Tabla 3 se presentan las fórmulas para calcularlos y las fuentes de información de cada uno de ellos.

Tabla 2. Indicadores de vulnerabilidad y exposición a la sequía, y su impacto en el suministro de agua.

Indicador	Tipo de indicador	Definición	Impacto en el suministro de agua
Densidad de población (hab/km^2)	Socioeconómico	Relación entre un espacio determinado y el número de personas que lo habitan (INEGI)	El crecimiento poblacional, la urbanización y migración han contribuido a incrementar la densidad poblacional de manera asimétrica en el territorio nacional; estos factores aumentan la problemática de prestar los servicios urbanos básicos (Mitchell, 2006; Kraas, 2008; Martínez *et al*., 2010; Semarnat, 2016)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Indicador	Tipo de indicador	Definición	Impacto en el suministro de agua
Población económica-mente activa desocupada (PEAD) (%)	Socioeconómico	Personas de 15 años y más que suministran la mano de obra disponible para la producción de bienes y/o servicios dirigidos al mercado, y que buscan trabajo habiendo trabajado alguna vez, o buscan trabajo por primera vez (INEE, 2016)	Las personas que viven en la pobreza, y carecen de los ingresos y otros recursos necesarios para obtener las necesidades básicas de la vida encuentran que es particularmente difícil enfrentar los impactos de la sequía (UNCCD, 2013)
Población en condiciones de pobreza (%)	Socioeconómico	Cuando tiene al menos una carencia social y su ingreso es insuficiente para adquirir los bienes y servicios que requiere para satisfacer sus necesidades alimentarias y no alimentarias (Coneval, 2018a)	
Ingreso *per cápita* anual (miles de pesos/año)	Socioeconómico	Relación entre el valor total de todos los bienes y servicios finales generados durante un año por la economía de una nación o entidad, y el número de sus habitantes ese año (INEE, 2016)	El mayor efecto neto de presión sobre los recursos hídricos nacionales en México proviene de entidades con valores de desarrollo humano menores en comparación con otras entidades (Semarnat, 2016)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Indicador	Tipo de indicador	Definición	Impacto en el suministro de agua
Volumen de agua producido superficial y subterráneo (m^3)	Gestión institucional	Volumen total de agua que se produce en un año; deben considerarse las captaciones que no tengan medición, según estudios previos. Este volumen reportado debe ser previo a los procesos de potabilización (Hansen & Alcocer, 2014)	La sequía se valora por el mayor o menor volumen de agua disponible en los embalses para poder atender las demandas actuales (Morales, Olcina, & Rico, 2000). El impacto de la sequía en la ciudad está mediado por la capacidad de almacenamiento de las presas, por el volumen de recarga del acuífero y por la capacidad de almacenamiento total del acuífero (Pineda-Pablos & Salazar-Adams, 2016)
Viviendas sin agua entubada, drenaje ni excusado (%)	Gestión institucional	Número de ocupantes en viviendas particulares que no dispone de agua entubada, drenaje ni excusado, entre el total de ocupantes en viviendas particulares, menos los ocupantes en viviendas particulares que no especificaron la disponibilidad de agua entubada y drenaje sanitario (Conapo, 2015a; Conapo, 2015b)	Es un indicador que forma parte de índice de rezago social, y refleja de manera directa la vulnerabilidad a la cual está sujeta la población al no contar con un servicio básico; por ende, ante la presencia del evento de sequía, aumenta la susceptibilidad de daño a la salud (Ortega-Gaucin *et al*., 2018)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Indicador	Tipo de indicador	Definición	Impacto en el suministro de agua
Eficiencia física (%)	Gestión institucional	Evalúa la eficiencia entre el volumen de agua facturado y producido por los OOAPAS (Hansen & Alcocer, 2014)	Minimizar las pérdidas físicas de agua en la distribución y eficiencia de la red de distribución (Pineda-Pablos & Salazar-Adams, 2016). Es indicativa no solo de la capacidad administrativa de los OOPAS, sino de las pérdidas en el sistema de distribución tanto por el mal estado de la red como por robos y agua no contabilizada (Camacho, 2012)
Micro y macromedición (%)	Gestión institucional	Capacidad de medir el agua consumida por los usuarios, así como el conocimiento real del agua entregada (Hansen & Alcocer, 2014)	Al contar con micromedición se sabe el consumo de cada usuario y se puede definir el cobro justo, según la tarifa autorizada; además, se identifican con mayor facilidad las fugas en los hogares mediante picos de consumo y se conoce el volumen total que se está entregando para el consumo. Con respecto a la macromedición, el parámetro al que se debe de aspirar es el 100 %, de esa manera se sabe con exactitud el volumen producido que sirve para llevar a cabo el balance hidráulico (Conagua, 2011)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Indicador	Tipo de indicador	Definición	Impacto en el suministro de agua
Relación tarifa-costo	Gestión institucional	Describe la conexión entre las tarifas del servicio de agua y los costos asociados a su suministro. Esto incluye gastos relacionados con mantenimiento, operación y administración (Camacho, 2012)	Ya que las tarifas no necesariamente reflejan el costo que tiene para un OOAPAS proporcionar determinado volumen de agua, dicha relación refleja el nivel de subsidio en las tarifas domésticas que, ante escenarios de cambio climático, podrían aumentar en relación con los costos de operación e inducir a un incorrecto uso del recurso (Camacho, 2012)
Eficiencia comercial (%)	Gestión institucional	Evalúa la eficiencia entre la facturación y el pago de la misma (Hansen & Alcocer, 2014)	Engloba todo tipo de acciones que permiten definir tarifas adecuadas, facturarlas y cobrarlas a los usuarios del servicio para garantizar la autosuficiencia financiera del organismo operador (SEAPAL, 2019)
Consumo (l/h/d)	Gestión institucional	Consumo real de agua sin tomar en cuenta las pérdidas por fugas en la red y tomas domiciliarias (Hansen & Alcocer, 2014)	Considerando el resultado de los futuros cambios climáticos, un incremento de la demanda de agua se traduce en mayores costos de operación; a esto se suma la problemática de escasez de agua y el crecimiento de la población (Camacho, 2012)
Horas con servicio continuo de agua (%)	Gestión institucional	Número de horas de servicio de agua continuo para los usuarios (Hansen & Alcocer, 2014)	

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Indicador	Tipo de indicador	Definición	Impacto en el suministro de agua
Volumen tratado (%)	Gestión institucional	Este indicador denota en % la tasa de tratamiento de agua residual colectada por la red de alcantarillado por una base del 70 % del volumen producido (Hansen & Alcocer, 2014)	La sequía no tiene impacto directo en las aguas residuales tratadas, pero sí puede usarlas como un recurso de primera mano en zonas con sequía. Además, la falta de sistemas de tratamiento han afectado el hábitat de flora y fauna de la región (Díaz-Cuenca, Alvarado-Granados, & Camacho-Calzada, 2012)
Calidad del agua superficial (DBO_5, mg/l)	Ambiental	La calidad del agua es un atributo que mide las propiedades físicas, químicas y biológicas del líquido (Peters, Campoy-Favela, & Flessa, 2009). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) es un indicador de contaminación de origen municipal y doméstico (Conagua, 2010)	El deterioro de las fuentes de abastecimiento de agua incide directamente en el nivel de riesgo sanitario presente y en el tipo de tratamiento requerido para su reducción; la evaluación de la calidad del agua permite tomar acciones de control y mitigación del mismo, garantizando el suministro de agua segura (Torres, Cruz, & Patiño, 2009)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Indicador	Tipo de indicador	Definición	Impacto en el suministro de agua
Calidad del agua subterránea (SDT, mg/l)	Ambiental	Los sólidos disueltos totales (SDT) pueden ser orgánicos y/o inorgánicos, provenientes de diferentes actividades domésticas, comerciales e industriales (Chibinda, Arada-Pérez, & Pérez-Pompa, 2017)	La calidad del agua se ve afectada por la actividad del hombre, la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos y las sequías prolongadas. Esto ha causado que los niveles de los mantos freáticos se vean disminuidos a niveles tales que la mineralogía del yacimiento en que está en contacto el agua cambia en sus características y se detectan niveles altos de metales en aguas que originalmente no tenían valores apreciables de éstos (Rocha, 2010)
Grado de presión del recurso hídrico (%)	Ambiental	Es un indicador porcentual de la presión a la que se encuentra sometido el recurso agua y se obtiene del cociente entre el volumen total de agua concesionada y el agua renovable (Conagua, 2017)	Se considera que si el porcentaje es mayor al 40 % se ejerce un grado de presión alto o muy alto (Conagua, 2017). En los ecosistemas áridos, la excesiva presión sobre el agua y sus impactos en los sistemas naturales amenazan la sostenibilidad global en tales zonas (Martínez, 2006)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Tabla 3. Fórmulas de los indicadores para el cálculo de los índices de vulnerabilidad y la exposición a la sequía.

Indicador	Fórmula	Fuente de información	Fuente de la fórmula
Densidad de población (hab/km^2)	$DP = \frac{No\ habitantes}{Área\ (Km^2)}$	Conapo y área de los municipios dentro de AM (2008-2018)	Conapo (2015b)
Población económicamente activa desocupada (PEAD) (%)	$PEAD = \frac{PEA\ desocupada}{PEA\ total} * 100$	ICU y SNIM (2008-2018)	INEGI (2020)
Población en condiciones de pobreza (%)	Multivariable	Coneval (2010-2015)	Coneval (2018b)
Ingreso per cápita anual (miles de pesos/año)	$IPCA = \frac{PIB\ anual}{Núm.habitantes}$	ICU y Conapo (2008-2018)	INEE (2016)
Volumen de agua potable producido (m^3)	El dato del volumen producido es el resultado de la macromedición en las fuentes de captación	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	Hansen y Alcocer (2014)
Viviendas sin agua entubada ni drenaje ni excusado (%)	$VSAEDE = \frac{NoVivSAE + NoVivSDE}{No.total\ viviendas} * 100$ *NoVivSAE:* número de viviendas sin servicio de agua entubada *NoVivSDE*: número de viviendas sin servicio de drenaje ni excusado	Conapo (2010-2015)	Conapo (2015b)
Eficiencia física (%)	$E_{FIS} = \frac{V_{AF}}{V_{APP}} * 100$	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	Conagua (2011), y Hansen y Alcocer (2014)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Indicador	Fórmula	Fuente de información	Fuente de la fórmula
	V_{AF}: vol. de agua facturado (m^3) V_{APP}: vol. anual de agua potable producido (m^3)		
Micro y macromedición (%)	$MICROMACRO = \frac{\left(\left({}^{M_{IC}}/_{T_{REG}}\right) + \left({}^{M_{AC}}/_{C_{APT}}\right)\right) * 100}{2}$ M_{IC}: núm. de micromedidores funcionando T_{REG}: núm. total de tomas registradas M_{AC}: núm. de macromedidores funcionando en captaciones C_{APT}: núm. de captaciones	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	Conagua (2011), Hansen y Alcocer (2014)
Relación tarifa-costo (adim.)	$R_{TC=\frac{T_{MD}}{C_{VP}}}$ T_{MD}: tarifa media domiciliaria ($) C_{VP}: costo por volumen producido ($)	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	Hansen y Alcocer (2014)
Eficiencia comercial (%)	$E_{COM} = \frac{V_{AP}}{V_{AF}} * 100$ V_{AP}: vol. de agua pagado (m^3) V_{AF}: vol. de agua facturado (m^3)	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	Conagua (2011), y Hansen y Alcocer (2014)
Consumo (l/hab/día)	$Consumo = \frac{V_{con} * 1000}{365 * hab}$ V_{con}: vol. de agua consumido (m^3/año) *hab*: habitantes	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	Hansen y Alcocer (2014)
Horas con servicio de agua continuo (%)	Número de horas con servicio de agua las 24 horas del día y los 7 días de la semana	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	SIAPA (2010), SIAPA (2017), SIAPA (2018), SADM (2010), SADM (2013),

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Indicador	Fórmula	Fuente de información	Fuente de la fórmula
			SADM (2014), SADM (2015), SADM (2017)
Volumen tratado (%)	$V_{TRAT} = \frac{V_{ART}}{V_{APP} * 0.70} * 100$ V_{ART}: vol. anual de agua residual tratada (m^3) V_{APP}: vol. anual de agua potable producida (m^3)	Datos proporcionados por SIAPA y SADM (2008-2018)	Hansen y Alcocer (2014)
Calidad del agua superficial (DBO_5, mg/l)	$DBO_5 = ODi - OD_5$ DBO_5: demanda bioquímica de oxígeno ODi (mg/l): oxígeno disuelto inicial OD_5 (mg/l): oxígeno disuelto al quinto día	SIAPA y SINA (2008-2018)	Norma Mexicana (NMX-AA-028-SCFI) (2001) y Conagua (2016)
Calidad del agua subterránea (SDT, mg/l)	$SDT = (ST) - (SST)$ SDT: sólidos disueltos totales ST: sólidos totales SST: sólidos suspendidos totales	SIAPA y Conagua (2008-2018)	Norma Mexicana (NMX-AA-034-SCFI-2015) (2015) y Conagua (2016)
Grado de presión sobre el recurso hídrico (%)	$\frac{VTAC}{VAR} * 100$ $VTAC$: volumen total de agua concesionada, superficial y subterránea (hm^3) VAR: volumen de agua renovable (hm^3)	Conagua (2008-2018)	Conagua (2017)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

3. Agrupación y recopilación de información

Para la agrupación de los indicadores, el IPCC (2014) propone que se agrupen basándose en la categoría de sus dos componentes: sensibilidad y capacidad de adaptación. Patnaik y Narayanan (2009) proponen un método en donde se agrupen de acuerdo con los tipos de vulnerabilidad. En este proyecto se combinan estas dos propuestas y los datos obtenidos se arreglaron en forma de una matriz rectangular, con filas que representan los indicadores según sea el tipo de vulnerabilidad y exposición, y las columnas que representan los componentes de la vulnerabilidad (Tabla 4 y Tabla 5).

Tabla 3. Agrupación de indicadores para el cálculo del índice de vulnerabilidad ante la sequía.

Tipo de vulnerabilidad		**Componentes de la vulnerabilidad**	
		Sensibilidad (S)	**Capacidad de adaptación (CA)**
General	**Socioeconómica**	-Población económicamente activa desocupada (PEAD) (%) -Población en condiciones de pobreza (%)	-Ingreso per cápita anual (miles de pesos/año)
	Gestión institucional	- Relación tarifa-costo (unidad) - Consumo (l/h/d) - Viviendas sin agua entubada ni drenaje ni excusado (%)	- Eficiencia física (%) - Eficiencia comercial (%) - Micro y macromedición (%)
	Ambiental	- Calidad del agua superficial (DBO_5) (mg/l) - Calidad del agua subterránea (SDT) (mg/l)	- Volumen tratado (%)

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tabla 5. Agrupación de indicadores para el cálculo del índice de exposición ante la sequía.

Tipo de exposición		Indicadores
General	**Socioeconómica**	- Densidad de población (hab/km^2)
	Gestión institucional	- Volumen de agua producido (m^3) - Horas con servicio continuo de agua (24 horas) (%)
	Ambiental	- Grado de presión del recurso hídrico (%)

Una vez recopilada la información de los indicadores seleccionados en una base de datos en Excel®, se realizó un análisis de multicolinealidad mediante el *software* SPSS®. Este *software* es sencillo de manejar y tiene un periodo de prueba de libre acceso (Castro, 2010; Abreu, Velázquez, & Velázquez, 2021). El SPSS adopta varios procedimientos para detectar multicolinealidad entre las variables independientes como, por ejemplo, la tolerancia y el factor de inflación de la varianza (Baños, Torrado-Fonseca, & Álvarez, 2019). El análisis de multicolineidad sirve para evitar la sobrerrepresentación de los indicadores seleccionados. Esto ocurre cuando las variables implicadas en un modelo llevan información redundante y la información de una o más variables también la aportan las otras; es decir, existen variables independientes que se encuentran fuertemente relacionadas entre sí (Gujarati, 2010). La técnica más común que se usa para detectar la presencia de multicolinealidad es el análisis de la matriz de correlación mediante el coeficiente de correlación de Pearson (*r*) (Astorga, 2014). Si dos conjuntos de datos tienen valores que muestran un coeficiente *r* superior a 0.90 (en el caso de correlación positiva) o inferior a -0.90 (en

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

el caso de correlación negativa), se debe eliminar al menos una de las variables involucradas, o bien agrupar ambas y crear un nuevo indicador (Pértegas & Pita, 2001). La evaluación de *r* en este trabajo se realizó por tipo de vulnerabilidad y exposición (socioeconómica, gestión institucional y ambiental), por lo tanto, solo se tomó en cuenta la relación de variables por cada uno de estos tipos de manera independiente. Se desestimaron los indicadores que tuvieron una correlación superior a 0.90 o inferior a -0.90, y la condición para eliminarlos fue que la correlación existiera tanto en el AMG como en el AHM. De acuerdo con el análisis del coeficiente *r* en las áreas de estudio, se optó por eliminar solo un indicador, el cual fue la población total, pues es la única variable que tiene una correlación positiva perfecta en los dos casos de estudio.

4. Normalización de los indicadores

Los objetivos de las técnicas de normalización son los siguientes: ajustar los datos para que no tengan diferentes unidades de medida y rangos de variación; y ajustar los datos en el caso en que sigan una distribución asimétrica o ante la presencia de datos atípicos (Bas-Cerda, 2014). Existen varios métodos de normalización. Para efectos de este trabajo se eligió el método de normalización de reescalamiento, ya que es robusto y uno de los más utilizados. Esta técnica fue definida por Drewnowski y Scott (1966), y es una de las más utilizadas en la construcción de numerosos índices sintéticos sociales y económicos (Actis-di-Pasquale & Balsa, 2017). Para una correlación positiva (↑), la fórmula es la siguiente:

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$X_{ij} = \frac{X_i - MinX_j}{Max\,X_j - Min\,X_j} \quad (14)$$

Donde:

X_{ij} = valor normalizado del indicador *(j)* con respecto al año *(i)*

X_i, = valor real del indicador con respecto al año *(i)*

$MinX_j$ y $MaxX_j$ = valores mínimo y máximo, respectivamente, del indicador (*j*) entre todos los años

En el caso de que exista una relación inversa entre el indicador y el constructo teórico, por ejemplo, la tasa de analfabetismo y el bienestar, el cálculo será el siguiente, que incluye un cambio direccional (Actis-di-Pasquale & Balsa, 2017), es decir, una correlación negativa (↓):

$$X_{ij} = \frac{Max\,X_j - X_i}{Max\,X_j - Min\,X_j} \quad (15)$$

Donde:

X_{ij} = valor normalizado del indicador *(j)* con respecto al año *(i)*

X_i = valor real del indicador con respecto al año *(i)*

$MinX_j$ y $MaxX_j$ = valores mínimo y máximo, respectivamente, del indicador (*j*) entre todos los años.

Un dato normalizado (*x*) es considerado atípico cuando la puntuación X_{ij} es mayor a 1 o con datos negativos.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

5. Determinación de los pesos de los indicadores

La ponderación consiste en que a cada indicador simple se le asigna un peso que se suele interpretar como una medida de la importancia relativa del indicador en la construcción del índice compuesto (Saltelli *et al*., 2008). En este trabajo se utilizó uno de los métodos de ponderación basados en modelos estadísticos, es decir, el método propuesto por Iyengar y Sudarshan (1982). Con este método se asigna a cada indicador un peso ponderado sobre todos los indicadores que se evalúan a través del estadístico de la varianza mediante la siguiente expresión:

$$P_{i=\frac{1}{(\sigma_i)(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sigma_i})}} \quad (16)$$

Donde:

P_i = peso ponderado del indicador *i*

σ_i = desviación estándar del conjunto de valores del indicador *i*

n = número de indicadores seleccionados

Este método de ponderación garantiza que grandes variaciones de uno o más indicadores no dominen la contribución del resto de los indicadores.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

6. Cálculo de los índices de vulnerabilidad y exposición

Por lo que respecta a la regla de agregación, no se disponen de criterios objetivos que permitan elegir el método más apropiado (Kang, 2002). La agregación aditiva ponderada (AAP), también conocida como el método de la suma ponderada (Blancas-Peral *et al*., 2011), se refiere al método de agregación lineal más utilizado en la construcción de un índice compuesto (*IC*) (Bandura & Martin, 2006; Nardo *et al*., 2005). La fórmula es la siguiente:

$$IC_c = \sum_{q=1}^{Q} w_q \, I_{qc} \qquad (17)$$

Donde:

w_q = peso del indicador *q*

I_{qc} = valor normalizado de la unidad de análisis *c* con respecto al indicador *q*, para *q* = 1,..., *Q* y *c* = 1,..., *M*

7. Ajustes de los índices de vulnerabilidad y exposición a una distribución probabilística

Las pruebas de bondad de ajuste permiten verificar qué tipo de distribución siguen los datos (Romero-Saldaña, 2016). La distribución probabilística servirá para evitar una clasificación arbitraria de los resultados de los índices sintéticos donde los límites entre una categoría y otra no están del todo definidos (Ortega-Gaucin *et al*., 2018). En este

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

trabajo se utilizó la prueba ampliada de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), ya que puede usarse para cualquier número de datos (*n*) en el rango $3 \leq n \leq 5\,000$. La metodología de esta prueba se puede consultar en el trabajo de Razali y Wah (2011). Para realizar la prueba ampliada de Shapiro-Wilk se utilizó el *software* Real-statics®. Este *software* es gratuito y amplía las capacidades estadísticas integradas de Excel (Zaiontz, 2024). Los resultados arrojaron que la distribución que siguen los índices de vulnerabilidad, y exposición del AMG y AHM es una distribución normal estándar.

8. Clasificación de los índices de vulnerabilidad y exposición

Una vez que se obtuvo la función de distribución, se clasificaron los índices de vulnerabilidad y exposición en cinco niveles en rango de percentiles, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 4. Grados de vulnerabilidad y exposición.

Grado de vulnerabilidad y exposición	Valor del percentil
Muy baja	$0 < I_{vi} \leq 20$
Baja	$20 < I_{vi} \leq 40$
Moderada	$40 < I_{vi} \leq 60$
Alta	$60 < I_{vi} \leq 80$
Muy alta	$80 < I_{vi} \leq 100$

Fuente: adaptada de Iyengar y Sudarshan (1982).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Índice de riesgo por sequía (IRS)

Para determinar los índices de riesgo por sequía (*IRS*) se utilizó la Ecuación (4). Después los valores de IRS se ajustaron a la prueba ampliada de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk (descrita anteriormente) para contrastar la normalidad de los datos; por último, se clasificaron en cinco niveles de riesgo (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto), de manera similar a los índices de vulnerabilidad y exposición (Tabla 6).

Resultados

Índice de amenaza o peligro por sequía (IA)

Se estimó el SDI en las estaciones de estudio para el año hidrológico de 12 meses (octubre-septiembre) por un periodo de 38 años (445 meses). Los resultados se muestran en la Tabla 7.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tabla 5. Porcentaje de meses registrados con sequía (1981-2018).

Área de estudio	Clave	Estación	% de meses registrados con sequía	% de meses con sequía leve	% de meses con sequía moderada	% de meses con sequía severa	% de meses con sequía extrema
AHM	24271	La Boca	64	80	18	2	0
	24088	El Cuchillo	53	71	24	5	0
	25042	Cerro Prieto	65	83	8	5	4
AMG	12396	Camécuaro	55	67	26	6	0
	12526	Yurécuaro II	47	59	22	14	4
	2935	Calderón	51	61	37	2	0
	12937	Zula	50	58	27	13	2

Los meses más críticos para cada una de las estaciones que pertenecen al AHM son los siguientes: en La Boca, septiembre-octubre de 1987, septiembre de 1990 y septiembre-octubre de 1991 registraron sequía severa (Figura 7a); en El Cuchillo, diciembre de 1994-febrero de 1995, septiembre-diciembre de 95, junio-julio de 1999 y julio-agosto de 2003 registraron sequía severa (Figura 7b); en Cerro Prieto, los meses de septiembre de 1990-marzo de 1991 y agosto-diciembre de 1993 registraron sequía extrema (Figura 7c).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

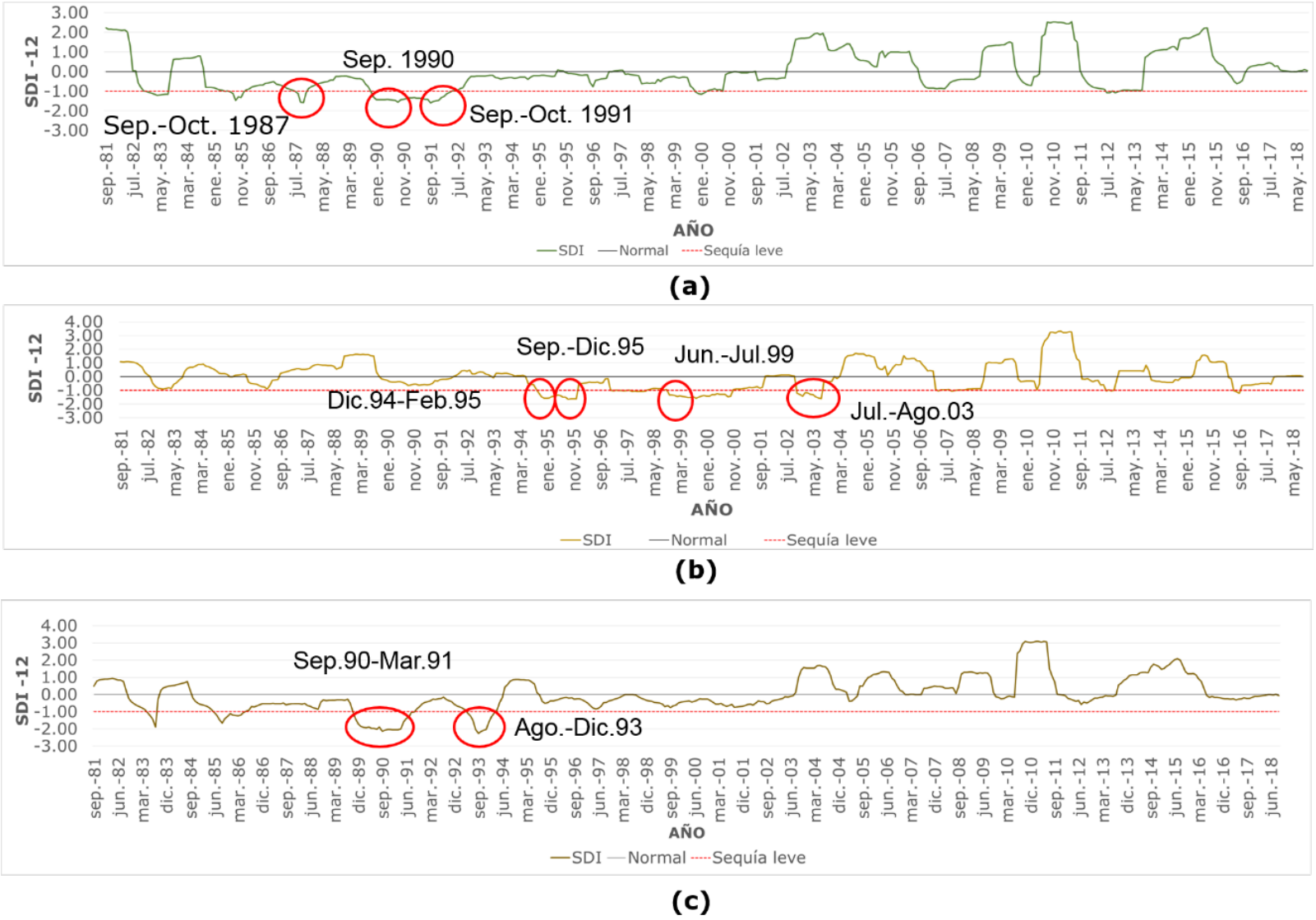


Figura 6. SDI de las estaciones hidrométricas del AHM (1981-2018): (a) La Boca, (b) El Cuchillo y (c) Cerro Prieto.

Los meses más críticos para cada una de las estaciones que pertenecen al AMG son los siguientes: en Camécuaro, septiembre-diciembre de 1983 y marzo- diciembre de 2013 registraron sequía severa

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(Figura 8a); en Yurécuaro II, julio de 1989-octubre de 1990 y noviembre de 2000-agosto de 2001 tuvieron sequía severa, y octubre de 2011-junio de 2012 tuvieron sequía extrema (Figura 8b); en Calderón, marzo-abril de 2001 y julio-septiembre de 2013 registraron sequía severa (Figura 8c); en Zula, abril-julio de 1990, octubre de 1986-mayo de 1987, octubre de 2000-junio de 2001 y julio-agosto de 2006 tuvieron sequía severa, y octubre de 2011-enero de 2012 registraron sequía extrema (Figura 8d). La clasificación de los estados de sequía (leve, moderada, severa extrema) se tomaron de la definición de los estados de sequía hidrológica con base en el SDI, propuesto por Nalbantis y Tsakiris (2009) (Tabla 1). La definición de los diferentes tipos de sequía se puede consultar en los trabajos de Wilhite (2000), y de Castellano-Bahena y Ortega-Gaucin (2022).

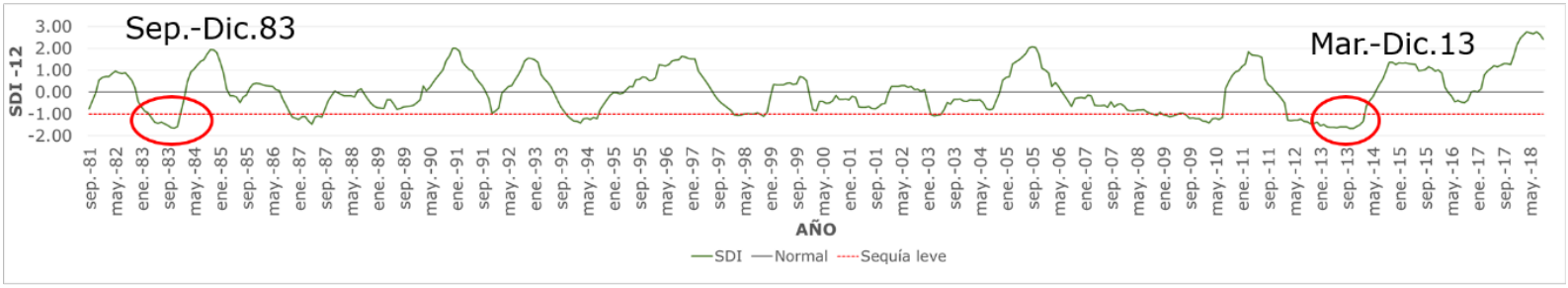
2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

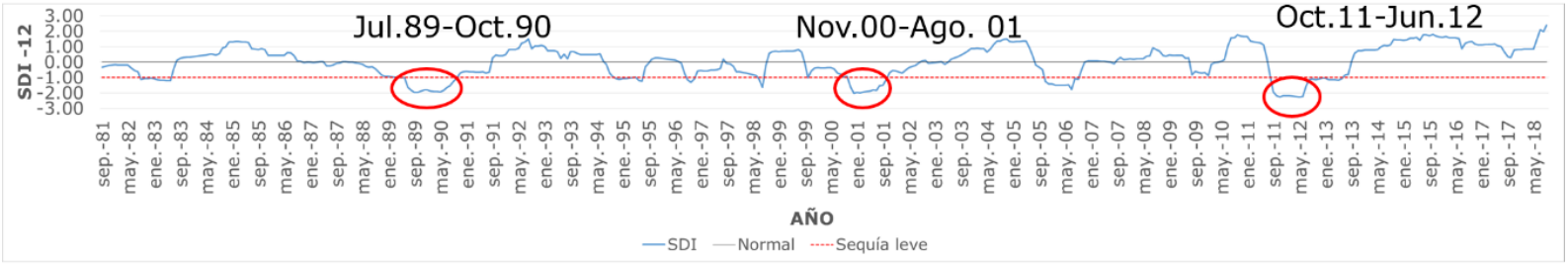
Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

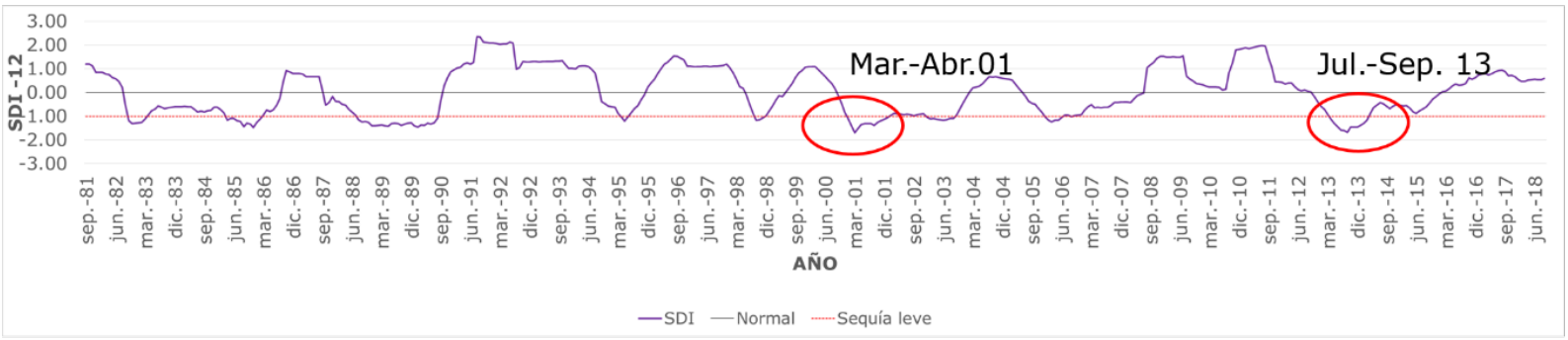
Check for updates



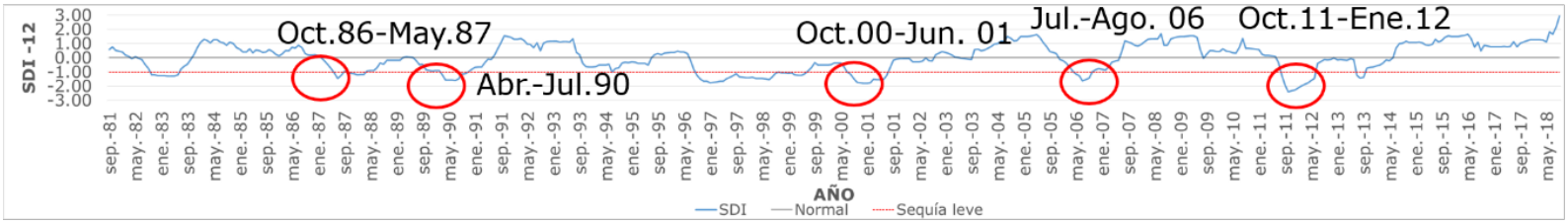
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. SDI de las estaciones hidrométricas del AMG (1981-2018): (a) Camécuaro, (b) Yurécuaro II, (c) Calderón y (d) Zula.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Índice de amenaza por sequía hidrológica

Se obtuvieron los IA del periodo 2008-2018. Para obtener los IA de cada año se consideraron los meses totales del periodo 1981 al año a evaluar, y los meses registrados con sequía (leve, moderada, severa y extrema) de las estaciones hidrométricas de estudio. En la Tabla 8 y Tabla 9 se muestran los valores de IA del AHM y AMG del periodo de estudio. Se observa que el AHM tiene IA ligeramente mayores que el AMG. De las estaciones que pertenecen al AHM, la estación La Boca es la que tiene el mayor IA y en lo que respecta al AMG es la estación Camécuaro. En cuantp a los años donde se incrementó el IA, en ambas áreas fueron los años 2008 y 2012-2013.

Tabla 6. IA de la sequía hidrológica con base en el SDI-12 en el AHM.

Año	IA por estación			IA medio
	La Boca	El Cuchillo	Cerro Prieto	
2008	0.75	0.54	0.71	**0.67**
2009	0.72	0.53	0.69	**0.64**
2010	0.72	0.53	0.68	**0.65**
2011	0.70	0.52	0.66	**0.63**
2012	0.71	0.53	0.67	**0.64**
2013	0.71	0.52	0.68	**0.64**
2014	0.69	0.53	0.66	**0.63**
2015	0.67	0.53	0.64	**0.61**
2016	0.67	0.52	0.63	**0.61**
2017	0.65	0.54	0.64	**0.61**
2018	0.64	0.53	0.65	**0.60**

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tabla 7. IA de la sequía hidrológica con base en el SDI-12 en el AMG.

Año	IA por estación				IA medio
	Camécuaro	Yurécuaro	Calderón	Zula	
2008	0.57	0.54	0.58	0.58	**0.57**
2009	0.58	0.53	0.56	0.56	**0.56**
2010	0.59	0.53	0.54	0.54	**0.55**
2011	0.57	0.52	0.52	0.53	**0.53**
2012	0.58	0.53	0.50	0.54	**0.54**
2013	0.59	0.54	0.52	0.56	**0.55**
2014	0.59	0.53	0.53	0.56	**0.55**
2015	0.58	0.51	0.55	0.55	**0.55**
2016	0.57	0.50	0.54	0.53	**0.54**
2017	0.56	0.48	0.52	0.52	**0.52**
2018	0.55	0.47	0.51	0.50	**0.51**

Índice de vulnerabilidad y exposición (IV e IE)

a) Índice de vulnerabilidad general (IVG)

El *IVG* se obtuvo a partir de los índices de *IVSE*, *IVGI* e *IVA*. Los resultados de este índice para el AHM muestran que en el periodo de estudio la tendencia de la vulnerabilidad general es ir a la baja. Por su parte, los resultados del AMG muestran que varía de un año a otro, aunque en los últimos años tiende a ir a la baja (Figura 9). Esto se debió al comportamiento de los índices que integran el *IVG*: los resultados del

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

IVSE en el AHM y AMG mostraron una tendencia a la baja, lo cual se debió a que la población económicamente activa desocupada y la población en condiciones de pobreza disminuyeron, y el ingreso per cápita anual aumentó en el periodo de estudio. Estos resultados son congruentes con los que comenta Cedillo (2017) sobre Nuevo león y Jalisco, que se encuentran entre las entidades que más aportan al PIB nacional, con el tercer y cuarto lugar, respectivamente (en 2014 aportaron en conjunto 13.61 %); también concuerdan con datos del INEGI (2021), que reporta que en 2020 su aportación en conjunto fue de 15.3 % del PIB nacional.

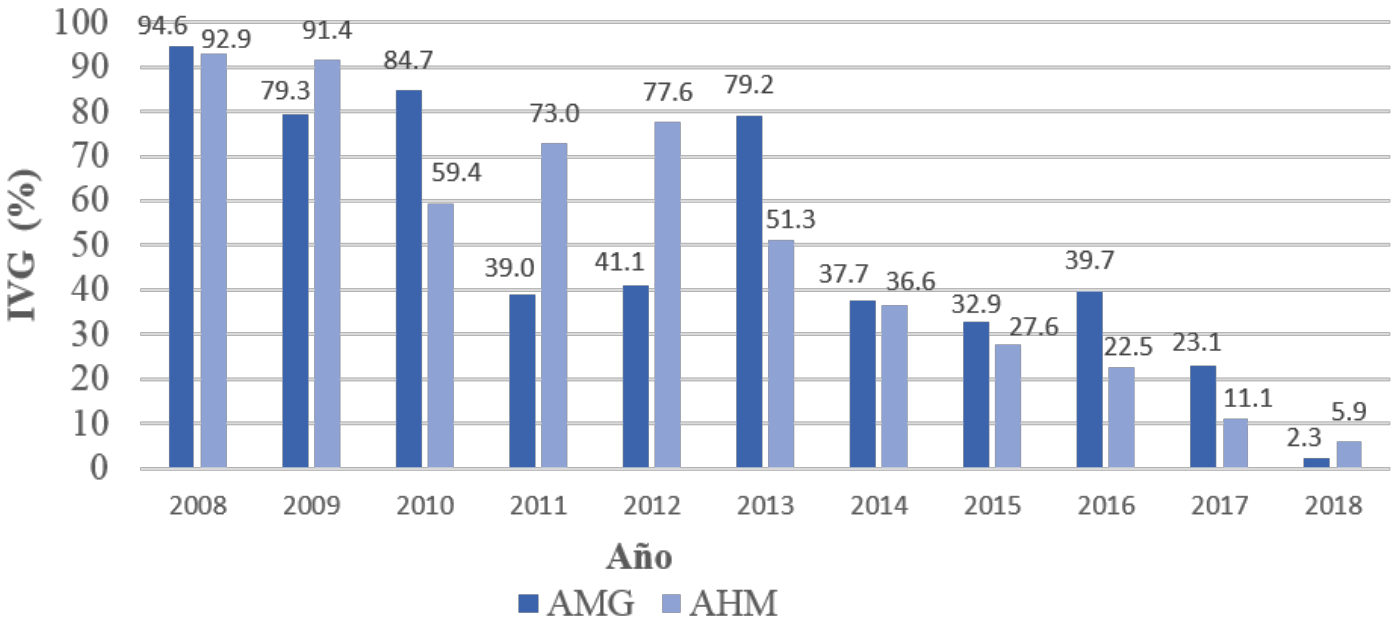


Figura 8. Evolución del IVG en el AMG y AHM (2008-2018).

Con respecto al AHM, los resultados del *IVGI* en lo relativo al SADM fueron muy cambiantes durante el periodo de análisis, sin una tendencia

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

específica. Su comportamiento se debió a que la eficiencia física, la eficiencia comercial y el consumo aumentaron y disminuyeron en el periodo de estudio. La disminución de la vulnerabilidad pudo deberse a algunas acciones que realizó el SADM en el AHM. Así, por ejemplo, en 2009 instaló 19.6 kilómetros de tubería en seis municipios del AHM; en 2013 instaló 2 mil 241 macromedidores, con lo que se logró una recuperación de 904.47 litros por segundo; en el periodo 2014-2018 se llevó a cabo sectorización, reparación de fugas, incremento de la cobertura de agua potable y mejoramiento de la eficiencia física en los macro sectores (SADM, 2010; SADM, 2013; SADM, 2014; SADM, 2015; SADM, 2017). Sobre el aumento de la vulnerabilidad, en 2011 y 2012 pasó de alta a muy alta, respectivamente; al respecto, la Conagua (2009b) comenta que entre los aspectos que hacen que la eficiencia física vaya disminuyendo se encuentran las dotaciones extraordinarias a zonas con asentamientos irregulares o a habitantes damnificados cuando suceden eventos climatológicos extremos. En cuanto al *IVA*, su tendencia es ir a la baja, lo cual se debe a que el SADM tiene el 100 % de volumen tratado y también a la disminución de los SDT, aunque la calidad del agua sigue siendo ligeramente salobre. En ese sentido, Alejandre, Valenzuela y Álvarez (2011) comentan que el AHM se localiza en un medio con escasez de agua, lo que crea una mayor conciencia en su uso y tratamiento por parte de la población.

Sobre el AMG, los resultados del *IVGI* en lo relativo al SIAPA, que administra el agua potable del AMG, fueron muy cambiantes durante el periodo de análisis, sin una tendencia específica. Su comportamiento se debió a que la eficiencia física y la micromedición aumentaron y disminuyeron en ese lapso. La disminución del *IVGI* en algunos periodos

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

se debió a que el SIAPA trabajó en la disminución del rezago en el agua no contabilizada a través del proceso de sectorización e instalación de medidores (SIAPA, 2010; SIAPA, 2017; SIAPA, 2018). Sin embargo, en otros periodos, el *IVGI* aumentó. Al respecto, McCulligh y Tetreault (2011) comentan que las pérdidas de aguas por fugas, desde hace mucho ha sido motivo de denuncia por parte de organizaciones sociales y civiles. El *IVA* mostró un comportamiento muy extremo de un año a otro. Este comportamiento se debe a los cambios en la calidad del agua superficial (DBO_5), subterránea (SDT) y al volumen tratado. Los resultados del incremento de DBO_5 son consistentes con lo que comentan De Anda y Maniak (2007) sobre la calidad del lago de Chapala, que se ha degradado por las descargas de aguas residuales, la disminución de los caudales del río y las extracciones de agua para el suministro a la AMG. En cuanto a los resultados de los SDT, éstos se incrementaron de manera considerable en 2012. Dicha alza pudo deberse a la sequía de 2011 que se presentó en la mayor parte de México (Ortega-Gaucin & Velasco, 2013). Finalmente, los resultados del volumen tratado subieron a partir del año 2011, con un promedio del periodo 2011-2018 de 68 %. Estos resultados son congruentes debido a que durante ese periodo se pusieron en operación dos macroplantas de tratamiento para las aguas residuales (PTAR): El Ahogado, inaugurada en 2012, y Agua Prieta, inaugurada en 2014 (McCulligh, 2019).

b) Índice de exposición general (IEG)

El *IEG* se obtuvo a partir de los índices de *IESE*, *IEGI* e *IEA*. Los resultados del IEG para el AMG y AHM muestran que su tendencia es ir al alza.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

(Figura 10); esto se debió al aumento de los tres índices. El *IESE* aumentó, ya que la densidad de población se incrementó considerablemente en el periodo de estudio; ello obedece a que no existe una planeación urbana debido a que los ayuntamientos y gobiernos estatales realizan proyectos y obras sin coordinación previa en los planes de desarrollo (Iracheta, 2010; Pacheco-Vega, 2014). El *IEGI* aumentó debido al incremento del volumen de agua potable producido; al respecto López, Garcia y Cortez (2014) comentan que ante el incremento de la población se demandan más espacios para viviendas y éstas, a la vez, demandan más servicios. Por último, el *IEA* aumentó debido al incremento del grado de presión sobre el recurso hídrico; en el caso del AHM se puede observar que en el periodo 2013-2014 y en el AMG en 2014, el IEG es bajo y esto pudo deberse a la presencia del huracán Ingrid en 2013; por tal motivo, el grado de presión del recurso hídrico pudo haber disminuido. En general, el comportamiento del *IEA* en las áreas de estudio se puede explicar debido a que regionalmente las zonas centro, norte y noroeste del país tienen fuerte presión sobre el recurso hídrico (Conagua, 2017).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

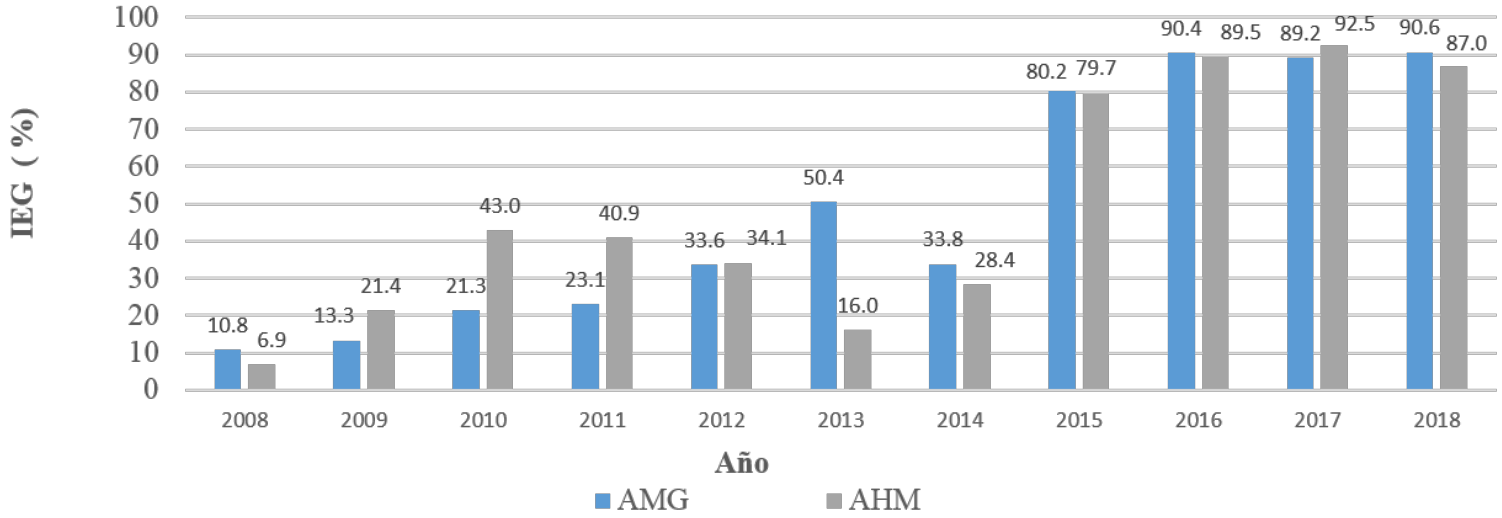


Figura 9. Evolución del IEG en el AMG y AHM (2008-2018).

Índice de riesgo por sequía (IRS)

Los resultados del IRS para el AMG y AHM muestran cambios abruptos en algunos años del periodo de análisis, aunque se aprecia una tendencia notable a ir en aumento, sobre todo en el AMG (Figura 11). Lo que se deduce es que las áreas de estudio son muy sensibles a las sequías hidrológicas. De acuerdo con los resultados del índice de amenaza por sequía hidrológica (*IA*), en ambas áreas de estudio la sequía moderada fue mayor que las sequías severas y extremas, además en estas áreas el *IEG* (representado por la densidad de población, volumen de agua potable producida y grado de presión del recurso hídrico) tiende a ir en aumento.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

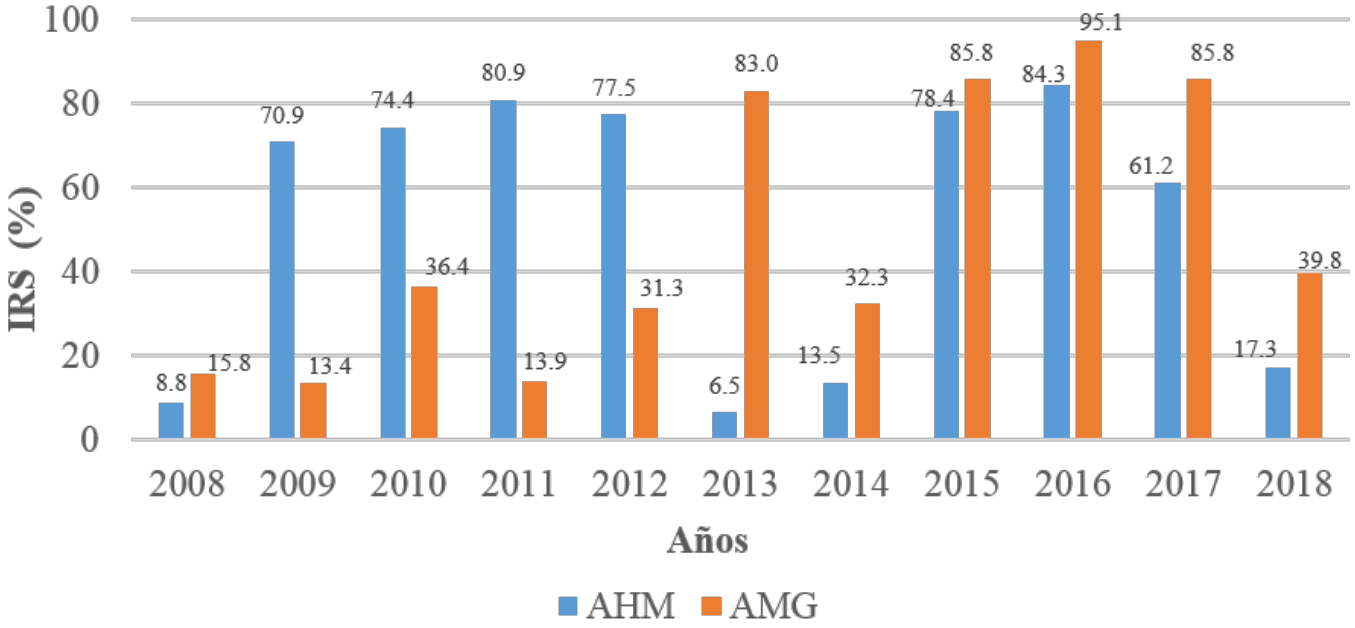


Figura 11. Evolución del IRS en el AHM y AMG (2008-2018).

Con respecto al AHM, en el periodo 2008-2011, el *IRS* pasó de muy bajo a muy alto, y esto se debió al *IVG* y al *IEG,* en específico al *IVSE* (pobreza) y al *IESE* (densidad de población), pues aumentaron en ese año. Estos resultados son consistentes con lo publicado por el Coneval (2018a), donde la pobreza a nivel nacional se incrementó 1.8 puntos porcentuales como efecto de la crisis financiera de 2008-2009, y también aumentó la volatilidad de los precios de los alimentos. En el caso del periodo 2013-2014, el *IRS* fue muy bajo, lo cual se debió a que el *IVA* disminuyó, ya que el SADM tiene el 100 % de volumen tratado, y también disminuyeron los SDT, aunque la calidad del agua sigue siendo ligeramente salobre. Con respecto *IVGI*, sus resultados fueron muy cambiantes de un año a otro sin una tendencia específica, lo cual se debió

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

a que la eficiencia física no aumentó en el periodo de análisis, lo que se tradujo en pérdidas por fugas. Aguilar y Monforte (2018) comentan que el volumen de agua no contabilizada en el AHM llegó a su nivel máximo en 2010, y se ha mantenido a partir de entonces, con una tendencia al alza. También se puede observar que la sequía meteorológica ocurrida en el periodo 211-2012 que se presentó como una sequía severa, no se percibió en el AHM y esto se debió al paso del huracán Alex en julio de 2010, donde se presentaron más de 60 horas de intensas lluvias y las presas se llenaron en su totalidad (Sedesol, 2010). Al respecto Aguilar-Barajas *et al*. (2015) comentan que el AHM tiene un sistema de abastecimiento de agua muy vulnerable, altamente dependiente de la presencia de huracanes para que se llenen las tres presas que surten al área. Por ejemplo, el 1° de septiembre de 2013, las presas El Cuchillo y Cerro Prieto se encontraban en niveles críticos después de dos años de sequía meteorológica. Las abundantes lluvias del 12 y 13 septiembre de ese mismo año (por la presencia del huracán Ingrid) permitieron la recuperación de estos embalses, ocultando así el grado de vulnerabilidad a la que está expuesta el AHM.

En el caso del AMG, en 2013 el *IRS* pasó de bajo a muy alto, y esto se debió a que aumentó el *IVG* y el *IEG*, en específico el *IVSE* (aumento de la población económicamente activa desocupada y la población en condiciones de pobreza); ello sucedió como efecto de la crisis financiera (Coneval, 2018b), y al *IVA* e *IEA* (niveles mayores de SDT, así como aumento del grado de presión sobre el recurso hídrico). Al respecto, Flores-Elizondo (2016) afirma que varias poblaciones reciben impacto ambiental por descargas de aguas residuales sin control en el AMG sin que haya responsabilidad sobre los efectos a la salud resultantes. En el

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

caso del *IVGI*, se observa un comportamiento de sube y baja durante todo el periodo de estudio, lo cual se debió a que en algunos años la capacidad de adaptación (eficiencia física, eficiencia comercial, micro y macromedición) y la sensibilidad (consumo) aumentaron y en otros años disminuyeron. Uno de los problemas con la disponibilidad del agua es la escasa capacidad de almacenamiento. La combinación de las características geológicas, orográficas y la disponibilidad natural de los ríos que cruzan el estado dan como resultado que los sitios propicios para la construcción de infraestructura de almacenamiento en Jalisco sean limitados (Conagua, 2009b). El lago de Chapala, a causa de la intensa sequía durante 2012, estuvo a punto de convertirse en un desierto (Huerta, Castañeda, & Mora, 2016).

Discusión

Discusión relativa a la metodología

En relación con las metodologías para evaluar el riesgo por sequía hidrológica en áreas urbanas, como se mencionó en la introducción, existe relativamente poca investigación. La diferencia entre la metodología que se propone en este trabajo con respecto a las demás analizadas es el enfoque que se le da y su propósito. En este trabajo se evalúan primero los elementos del riesgo por sequía por separado (amenaza, vulnerabilidad y exposición) y después se analizan en conjunto para calcular el grado de riesgo de las áreas metropolitanas bajo análisis (AHM y AMG).

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Durante la realización de este estudio se presentaron una serie de limitantes que dificultaron el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos. Dentro de éstas destacan:

- La evaluación del peligro por sequía se vio limitada por la disponibilidad de información sobre los datos hidrométricos. Específicamente, hay carencia de información sobre las extracciones de aguas subterráneas y, en el caso de las aguas superficiales, algunas estaciones hidrométricas se omitieron, ya que más del 80 % de sus registros estaba incompletos y no era pertinente rellenarlos con algún método. Las estaciones hidrométricas seleccionadas cubren la zona de estudio.
- El tamaño de la muestra del periodo de estudio para la evaluación de los índices de vulnerabilidad y exposición fue de solo 11 años, lo cual se debió a que no se encontró información para todos los indicadores propuestos en años previos.
- Participación de los directivos de los OOAPAS en las dos áreas de estudio. Se tuvo su participación en la elección de los indicadores propuestos para la evaluación de los índices de vulnerabilidad y exposición, pero por motivo de la pandemia de la COVID-19 fue imposible una nueva reunión para la elección de los pesos de estos indicadores, así que en su lugar se optó por un método de ponderación alterno. Esto pudo afectar el nivel de importancia que se le dio a cada indicador y al final haber influido en los resultados de la vulnerabilidad y exposición.
- La evaluación del riesgo por sequía en estas dos áreas de estudio se basa en datos publicados de diferentes dependencias, así que pueden

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

estar sesgados por la calidad de los indicadores y los métodos de ponderación utilizados.

A pesar de las limitaciones anteriores, se debe resaltar que la fortaleza de este estudio consistió en desarrollar una metodología para calcular el riesgo por sequía hidrológica en áreas urbanas, y que ésta puede ser replicable en otras zonas, además de contribuir al cierre de la brecha que hay en los estudios sobre la temática en cuestión.

Discusión relativa a los resultados

Los resultados mostraron que debido a que en las áreas de estudio el suministro de agua proviene más de la mitad de fuentes superficiales, esto la hace muy sensibles a las sequías hidrológicas, cuyas características se determinaron mediante el SDI. Se observa que el AHM tiene IA ligeramente mayores que el AMG.

Los resultados del IRS muestran que la tendencia en el AHM y AMG es ir en aumento, pues la población en esas áreas se ha incrementado y, por lo tanto, demanda más agua y está sufriendo de estrés hídrico. Se observa que cuando la población en condiciones de pobreza aumenta al igual que la población económicamente desocupada, y el ingreso *per cápita* disminuye, el IRS es mayor. Con respecto al IVGI y al IEGI, se observa que también la tendencia es ir al alza, ya que debido incremento de la población se está extrayendo más agua en un servicio continuo de 24/7 y, además, la eficiencia física no aumenta y esto resulta en pérdidas en fugas. Con respecto al IEA en el AHM y AMG, se observa una tendencia de ir al alza, debido a que el grado de presión del recurso hídrico ha ido

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

en aumento. En el caso del AMG, la calidad del agua superficial tiene indicios de contaminación. La calidad del agua subterránea es dulce (Conagua, 2016), sin embargo se puede observar cómo se incrementaron los SDT de manera considerable en 2012, lo cual pudo deberse a la sequía de 2011 que se presentó en la mayor parte de México.

Los resultados de la presente investigación confirman las declaraciones de Esparza (2014) sobre la idea de que los efectos agravados de las sequías y la escasez de agua no solo son por causas naturales, sino también por causa de factores sociales, donde se destacan las malas políticas de administración y el uso de las reservas de agua. Además, confirman lo escrito por Pineda-Pablos y Salazar-Adams (2016), quienes afirman que la sequía no tiene un efecto directo en los sistemas urbanos de agua, sino que está mediada por la infraestructura y gestión del agua; que el principal obstáculo para que las ciudades efectúen una gestión adaptativa del agua es la falta de sistemas de información confiable. También confirman las aseveraciones de Ahmadalipour *et al*. (2019), quienes consideran imprescindible controlar el crecimiento de la población para mitigar el riesgo por sequía, pues mejora la vulnerabilidad socioeconómica y reduce la exposición potencial a la sequía. Por último, se confirma la declaración de Camacho (2012) sobre que el incremento en la vulnerabilidad obligará a los organismos operadores a adaptarse a las nuevas condiciones impuestas por el cambio climático, las cuales no solo estarán asociadas con un incremento de la demanda, sino también con una mayor presión sobre las fuentes de agua, una disponibilidad menor y cambios en la calidad del agua, por mencionar algunas; elevando así los costos operativos y administrativos en una mayor proporción.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

Las consecuencias de no contar con estrategias de gestión de riesgo para la disminución de la vulnerabilidad y la exposición se reflejaron en las crisis por la sequía intensa que se vivió en muchas partes de México en 2021, donde varias zonas urbanas, como Monterrey y la Ciudad de México, tuvieron severas restricciones en la disponibilidad y el suministro de agua a sus respectivas poblaciones, como lo mostraron las notas periodísticas de Meléndez (2021); Manuela (2021); Badillo (2021); Ramírez (2021); Martín (2021); Enciso, Davila, Partida, Nuñez y Chio (2021), y Flores (2021).

Conclusiones

Existe una amplia gama de enfoques, métodos y herramientas para determinar las componentes del riesgo por sequía, sin embargo, no hay métodos que sean universalmente aplicables para hacer estas evaluaciones, ya que el fenómeno de la sequía depende de muchos factores contextuales y sus efectos son distintos en cada caso. A partir de los 108 artículos científicos analizados sobre el tema, se observó que existe muy poca investigación respecto a las metodologías de riesgo urbano por sequía; de los trabajos encontrados solo en cinco de ellos se encuentra involucrada el área urbana de manera indirecta; por lo tanto, se concluye que existen vacíos de conocimiento y áreas de oportunidad importantes en los estudios del riesgo por sequía hidrológica en áreas urbanas. Este trabajo tuvo como objetivo contribuir al cierre de la brecha mencionada.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

De acuerdo con los resultados obtenidos, se demostró que la metodología propuesta es factible y útil en la evaluación del riesgo por sequía en las áreas bajo estudio (AHM y AMG). Los principales resultados de esta investigación se relacionan de manera positiva con los de otros estudios previos, como son los trabajos de Camacho (2012), Esparza (2014), Pineda-Pablos y Salazar-Adams (2016), y Ahmadalipour *et al*. (2019), y con lo que reportaron los principales diarios locales y nacionales sobre el impacto de la sequía en estas dos áreas para los últimos años. Por ejemplo, en el AMG se evidencia la deficiente gestión institucional, incremento de la población desmedida, mala calidad del agua, falta de cobertura de agua potable para algunas colonias, estrés hídrico y el impacto socioeconómico de la población en la compra de tinacos (Meléndez, 2021; Manuela, 2021; Badillo, 2021; Ramírez, 2021; Martín, 2021).

En el caso del AHM, se evidencia el grado de presión sobre el recurso hídrico, una eficiencia física que no incrementa y que resulta en pérdidas por fugas. Este último resultado coincide con los reportados por García *et al*. (2012), Aguilar-Barajas *et al*. (2015), y Aguilar y Monforte (2018), quienes comentan que a pesar de que la gestión actual en el AHM es considerada como eficiente cuando se evalúa en términos de indicadores de desempeño y eficiencia operativa, esta condición no es suficiente para ser considerada como sustentable.

La forma en que han evolucionado la vulnerabilidad, la exposición y el riesgo por sequía en el AHM y AMG facilita la comprensión de los riesgos, y se pueden desarrollar planes de adaptación y mitigación

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 16(1), 295-380. DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-07

apropiados. Esto también puede contribuir al cambio de paradigma de reactivo a proactivo en la atención de la sequía.

Finalmente, se recomienda que para estudios posteriores se involucre a los tomadores de decisiones, como pueden ser los directivos y operativos de los OOAPAS, en el proceso de evaluación de los distintos componentes del riesgo por sequía. En lo que respecta específicamente a la evaluación de la vulnerabilidad, ésta puede mejorarse incorporando el índice de corrupción en lugares donde dicho índice esté disponible; por último, es importante promover que los OOAPAS cuenten con información de indicadores confiables y de calidad para evaluar de forma adecuada su desempeño institucional.

Agradecimientos

A los doctores Héctor David Camacho González, Martín José Montero Martínez, Sergio Vargas Velázquez y Edmundo Pedroza González, por sus valiosas contribuciones para la realización de este proyecto de investigación. Mi profundo agradecimiento al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por el apoyo otorgado en la realización de mis estudios doctorales.

Referencias

Abreu, M. A., Velázquez, M. R., & Velázquez, D. C. (2021). Acciones metodológicas para la toma de decisiones con el uso de SPSS en la estadística inferencial. *Revista Conrado*, 17(S1), 125-132.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Actis-di-Pasquale, E., & Balsa, J. (2017). La técnica de escalamiento lineal por intervalos: una propuesta de estandarización aplicada a la medición de niveles de bienestar social. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 23, 164-196. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=233151826008

Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., Castelletti, A., & Magliocca, N. (2019). Future drought risk in Africa: Integrating vulnerability, climate change, and population growth. *Science of the Total Environment,* 662, 672-686. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.278

Aguilar-Barajas, I., Sisto, N. P., & Ramírez, A. I. (2015). *Agua para Monterrey. Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México*. Recuperado de https://repositorio.tec.mx/handle/11285/642843

Aguilar, B, I., & Monforte, G. (2018). Servicios públicos del agua, valor público y sostenibilidad: el caso del área metropolitana de Monterrey. *Gestión y Política Pública*, 27(1), 149-179. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792018000100149&lng=es&tlng=es

Alejandre, J. A., Valenzuela, I. C., & Álvarez, J. D. R. (2011). *Gobernanza urbana y medio ambiente en la zona metropolitana de Guadalajara en desarrollo insostenible. Gobernanza, agua y turismo.* Serie Ciclos y Tendencias en el Desarrollo de México/42. México, DF, México: Casa Juan Pablos Centro Cultural, S. A. de C.V.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Astorga, J. M. (2014). Aplicación de modelos de regresión lineal para determinar las armónicas de tensión y corriente. *Ingeniería Energética*, 35(3), 234-241. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329132445008

Baños, R. V., Torrado-Fonseca, M., & Álvarez, M. R. (2019). Análisis de regresión lineal múltiple con SPSS: un ejemplo práctico. *REIRE Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 12(2), 1-10. Recuperado de https://revistes.ub.edu/index.php/REIRE/article/view/reire2019.12.222704

Badillo, D. (27 de marzo, 2021). Inicia estiaje y el Valle de México y Guadalajara padecen ya desabasto de agua. *El Economista*. Recuperado de https://www.eleconomista.com.mx/politica/Inicia-estiaje-y-el-Valle-de-Mexico-y-Guadalajara-padecen-ya-desabasto-de-agua-20210327-0001.html

Bas-Cerda, M. del C. (2014*). Estrategia metodológica para la construcción de indicadores compuestos en la gestión universitaria* (tesis doctoral). Editorial Universitat Politècnica de València. DOI: 10.4995/Thesis/10251/35330

Bandura, R., & Martin, C. (2006). *A survey of composite indices measuring country performance: 2006*. New York, USA: United Nations Development Programme, Office of Development Studies.

Batelis, S. C., & Nalbantis I. (2014). Potential effects of forest fires on streamflow in the Enipeas River Basin. Thessaly, Greece. *Environmental Processes*, 1(1), 73-85. DOI: 10.1007/s40710-014-0004-z

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Blancas-Peral, F. J., Contreras-Rubio, I., & Ramírez-Hurtado, J. M. (2011). Construcción de indicadores sintéticos una aproximación para maximizar la discriminación. XIX Jornadas de ASEPUMA-VII Encuentro Internacional. *Anales de la Asociación Española de Profesores Universitarios de Matemáticas (ASEPUMA)*, 19(0110), 1-23. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6017719

Blauhut, V. (2020). The triple complexity of drought risk analysis and its visualisation via mapping: A review across scales and sectors. *Earth-Science Reviews*, 210, 103345. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103345

Breña-Naranjo, A. (2021). Seguridad hídrica en tiempos de sequía. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). *Perspectivas IMTA*, 14, DOI: 10.24850/b-imta-perspectivas-2021-14

Camacho, D. (2012). *Metodología de evaluación de costos de adaptación al cambio climático en Organismos Operadores de Agua (OOPAS)*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/941/DP1342.1.pdf?sequence=1

Castellano-Bahena, H. V., & Ortega-Gaucin, D. (2022). Marco conceptual y metodológico del riesgo por sequía y sus componentes: amenaza, exposición y vulnerabilidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(2), 1-84. DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-01

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Castro, L. A. P. (2010). Las principales causas de riesgo de los microcréditos otorgados por el banco de las oportunidades en la ciudad de Villavicencio en el periodo 2005-2006. *Cap & Cua*, 3(1), 4-5.

Cedillo, J. L. (2017). México entre la carencia y abundancia del agua. *Revista Digital Universitaria*, 18(2). Recuperado de http://www.revista.unam.mx/vol.18/num2/art21/art21.pdf

Chibinda, C., Arada-Pérez, Ma. A., & Pérez-Pompa, N. (2017). Caracterización por métodos físico-químicos y evaluación del impacto cuantitativo de las aguas del Pozo la Calera. *Revista Cubana de Química*, 29(2), 303-321. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212017000200010&lng=es&tlng=es

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2009a). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Jalisco*. Recuperado de https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/Programa%20H%C3%ADdrico%20Visi%C3%B3n%202030%20del%20Estado%20de%20Jalisco.pdf

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2009b). *Manual de incremento de eficiencia física, hidráulica y energética en sistemas de agua potable*. Recuperado de https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/publicaciones_conagua/Archivos%20de%20la%20SEMARNAT/Investigacion%20y%20tecnologia%20del%20Agua-PENDIENTET/Manual%20de%20Incremento-2009.pdf

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2010). *El agua en México: cauces y encauces.* Recuperado de https://agua.org.mx/biblioteca/el-agua-en-mexico-cauces-y-encauces/

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2011). *Programa de Seguimiento de Indicadores de Gestión para Cumplimiento de Meta de Eficiencia Global. Manual de Indicadores de Gestión*. Recuperado de https://www.oromapas.gob.mx/transparencia/XXX/manualdeindicadores.pdf

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2014). *Política pública nacional para la sequía, documento rector*. Recuperado de https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Pol%C3%ADtica%20P%C3%BAblica%20Nacional%20para%20la%20Sequ%C3%ADa%20Documento%20Rector.pdf

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015a). *Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) para usuarios urbanos de agua potable y saneamiento*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99851/PMPMS_Monterrey_NL.pdf

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015c). *"PMPMS para usuarios urbanos de agua potable y saneamiento", Organismo de Cuenca Río Bravo*. México, DF, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2016). *Monitoreo de la calidad del agua en México*. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/documentos/monitoreo-de-la-calidad-del-agua-en-mexico

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2017). *Estadísticas del agua en México.* Recuperado de https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf

Coneval, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (2018a). *Informe de pobreza y evaluación 2018*. Recuperado de https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Documents/Informes_de_pobreza_y_evaluacion_2018_Documentos/Informe_Nuevo_Leon_2018.pdf

Coneval, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (2018b). *Anexo único de los lineamientos y criterios generales para la definición, identificación y medición de la pobreza*. Recuperado de https://www.coneval.org.mx/Normateca/Documents/ANEXO-Lineamientos-DOF-2018.pdf

Conapo, Consejo Nacional de Población. (2015a). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. Recuperado de https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015

Conapo, Consejo Nacional de Población. (2015b). *Anexo C: metodología de ubicación del índice de marginación por localidad*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/159050/07_Anexo_C.pdf

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

De-Anda, J., & Maniak, U. (2007). Modificaciones en el régimen hidrológico y sus efectos en la acumulación de fósforo y fosfatos en el lago de Chapala, México. *Interciencia,* 32(2), 100-107. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000200007

Gobierno del Estado de Jalisco. (2015). *Decreto 25400/LX/15 de 2015, que reforma el artículo único del diverso número 23021 en el que se establecen los municipios que integran el AMG*. Recuperado de http://sigat.semadet.jalisco.gob.mx/urbano/index_archivos/pdf/Decreto%20AMG.pdf

Gobierno del Estado de Jalisco (2013). *Decreto 24805/LX/13 de 2013. Ley que crea el Organismo Público Descentralizado del Poder Ejecutivo denominado Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado*. Recuperado de https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/newspaper/import/12-24-13-x.pdf

Drewnowski, J., & Scott, W. (1966). *The level of living index* (Report No. 4). Geneva, Switzerland: United Nations Research Institute for Social Development.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Díaz-Cuenca, E., Alvarado-Granados, A. R., & Camacho-Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 14(1), 78-97. Recuperado de https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf

Enciso, A., Davila, I., Partida, J. C., Nuñez, E., & Chio, Y. (29 de marzo, 2021). *Grandes zonas metropolitanas sufren por sequía y escasez*. Recuperado de https://www.jornada.com.mx/notas/2021/03/29/politica/grandes-zonas-metropolitanas-sufren-por-sequia-y-escasez/

Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia. Revista de Historia y Ciencias Sociales*, (89), 193-219. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-03482014000200008&lng=es&tlng=es

FAMM, Fondo de Agua Metropolitano de Monterrey. (2018). *Plan hídrico Nuevo León, 2050*. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/10/Plan-Hi%CC%81drico-NL-2050.pdf

Flores, L. (13 de mayo, 2021). Presas de Nuevo León con baja captación de agua podrían racionar suministro. *El Economista*. Recuperado de https://www.eleconomista.com.mx/estados/Presas-de-Nuevo-Leon-con-baja-captacion-de-agua-podrian-racionar-suministro-20210513-0107.html

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Flores-Elizondo, R. (2016). Gestión integral urbana del agua. Complejo de proyectos posibles para el Área Metropolitana de Guadalajara. En: Cortés-Lara M. A. (coord.). *Aportes a la sustentabilidad, una mirada desde la gestión del territorio y los recursos naturales* (pp. 221-240). Guadalajara, México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente ITESO. Recuperado de https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/5520/9786079473853-REI.pdf?sequence=2&isAllowed=y#page=222

Füssel, H. M. (2004). Coevolution of the political and conceptual frameworks for climate change vulnerability assessments. In: Bierman, F., Campe, S., Jacob, K. (eds.). *Proceedings of the 2002 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change Knowledge for Sustainability Transition: The Challenge for Social Science* (pp. 302-320). Amsterdam, The Netherlands: Global Governance Project. Recuperado de http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.6189&rep=rep1&type=pdf#page=308

García, G. M., Benítez, I. A., & Gaudiano, E. G. (2012). Limitaciones de una gestión sectorizada para la sustentabilidad del agua: caso Monterrey, México. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, 20(1), 53-63. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5001843

Gujarati, D. N. (2010). *Econometría* (5ª ed.). México, DF, México: Editorial McGraw-Hill/Interamericana.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Hansen, M. P. & Alcocer, V. H. (2014*). Indicadores de gestión prioritarios en organismos operadores. Informe final*. Recuperado de http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1441

Huerta, P., Castañeda, A. A., & Mora, O. (2016). Impacto social del agua en la Región Centro Occidente y Los Altos de Jalisco, México. *Contribuciones a las Ciencias Sociales* (enero-marzo 2016). Recuperado de http://www.eumed.net/rev/cccss/2016/01/agua.html

INEE, Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación. (2016). *Panorama Educativo de México 2015. Indicadores del Sistema Educativo Nacional. Educación Básica y Media Superior*. Recuperado de https://historico.mejoredu.gob.mx/wp-content/uploads/2019/01/P1B114.pdf

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Conociendo Jalisco*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/JALISCO.pdf

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Nota técnica de la encuesta nacional de ocupación y empleo. Nueva edición (ENOE^{N})^{1}, cifras durante el tercer trimestre de 2020*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enoe/15ymas/doc/enoe_n_nota_tecnica_trim3_2020.pdf

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Producto interno bruto por entidad federativa 2020. Comunicado de prensa Núm. 727/21.* Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/pibe/PIBEntFed2020.pdf

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds.)*. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf

IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 34). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_es-1.pdf

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Iracheta, C, A. (2010). *Evaluación del Fondo Metropolitano 2006-2009*. México, DF, México: Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Banco Interamericano de Desarrollo, Colegio Mexiquense. Recuperado de https://fdocuments.mx/document/fondo-metropolitano.html

Iyengar, N. S., & Sudarshan, P. (1982). A method of classifying region from Multivariate Data. *Economic and Political Weekly*, 17(51), Special Article, 2048-2052. Recuperado de http://library.isical.ac.in:8080/jspui/bitstream/10263/1301/1/EAPW-17-51-1982-P2047-2052.pdf

Kang, S. M. (2002). A sensitivity analysis of the Korean Composite Environmental Index. *Ecological Economics*, 43(2-3), 159-174. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00207-0

Kraas, F. (2008). *Megacities as global risk areas: Urban ecology* (Marzluff, J., Shulenberger, E., Endlicher, W. *et al*. (eds.) (pp. 583-596). New York, USA: Springer US.

Knutson, C., Hayes, M. J., & Philips, T. (1998). *How to reduce drought risk. A guide prepared by the Preparedness and Mitigation Working Group of the Western Drought Coordination Council*. Lincoln, USA: National Drought Mitigation Center. Recuperado de https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/168/

Khoshnazar, A., Corzo, G. A., & Diaz, V. (2021). Spatiotemporal drought risk assessment considering resilience and heterogeneous vulnerability factors: Lempa transboundary river basin in the Central American Dry Corridor. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 386. DOI: 10.3390/jmse9040386

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

López, R. I., Garcia, R, J., & Cortez, M, P.E. (2014). *La micro medición del agua como instrumento de gobernabilidad a largo plazo para grandes núcleos urbanos*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Ramon-Hernandez-3/publication/275583771_LA_MICRO_MEDICION_DEL_AGUA_COMO_INSTRUMENTO_DE_GOBERNABILIDAD_A_LARGO_PLAZO_PARA_GRANDES_NUCLEOS_URBANOS/links/553ffcd70cf2320416eceb39/LA-MICRO-MEDICION-DEL-AGUA-COMO-INSTRUMENTO-DE-GOBERNABILIDAD-A-LARGO-PLAZO-PARA-GRANDES-NUCLEOS-URBANOS.pdf

Malik, A., Kumar, A., Salih, S. Q., & Yaseen, Z. M. (2021). Hydrological drought investigation using streamflow drought index. In: Deo, R., Samui, P., Kisi, O., & Yaseen, Z. (eds.). *Intelligent data analytics for decision-support systems in hazard mitigation* (pp. 63-88). Singapore: Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. DOI: 10.1007/978-981-15-5772-9_4

Manuela, C. (15 de abril, 2021). Jalisco tiene "un desastre" en la gestión del agua: investigador. *Notisistema*. Recuperado de https://www.notisistema.com/noticias/jalisco-tiene-un-desastre-en-la-gestion-del-agua-investigador/

Martín, R. (3 de abril, 2021). No es sequía, es saqueo. *Informador*. Recuperado de https://www.informador.mx/ideas/No-es-sequia-es-saqueo--20210403-0022.html

Martínez, J. (2006). Agua y sostenibilidad: algunas claves desde los sistemas áridos. Centro de Investigación, Sociedad y Políticas Públicas (CISPO). *Polis: Revista Latinoamericana*, 14, 1-13.

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Martinez, S., Delgado, J., Escolero, O., Domínguez, E., Suarez, M., Fernandez-Bernal, A., & De la Rosa, M. A. (2010). *Socio-economic development in arid zones: The influence of water availability in the San Luis Potosi Basin, Mexico*. *Arid Environmental*. New York, USA: Nova Science Publishers.

MacKenzie, C. A. (2014). Summarizing risk using risk measures and risk indices. *Risk Analysis,* 34(12), 2143-2162. DOI: 10.1111/risa.12220

McCulligh, C., & Tetreault, D. (2011). *La gestión del agua en la Zona Metropolitana de Guadalajara. El modelo dominante versus las alternativas de la sociedad civil organizada*. Seminario Taller Agua, Ciudad y Cambio Climático, Guadalajara, México, 8-9, September.

McCulligh, C. (2019). *Los retos políticos y sociales del saneamiento de aguas residuales municipales: casos de la cuenca alta del río Santiago* (tesis doctoral). Recuperado de https://estudiosdeldesarrollo.mx/wp-content/uploads/2019/10/piCindy.pdf

Meléndez, V. (30 de marzo, 2021). Confirman que agua turbia es por contaminación. *El Norte*. Recuperado de https://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?urlredirect=https://www.elnorte.com/confirman-que-agua-turbia-es-por-contaminacion/ar2154011?v=4&Fuente=MD&referer=--7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783a--

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Mitchell, V. G. (2006). Applying integrated urban water management concepts: A review of Australian experience. *Environmental Management*, 37(5), 589-605. DOI: 10.1007/S00267-004-0252-1

Morales, A., Olcina, J., & Rico, A. M. (2000). Diferentes percepciones de la sequía en España: adaptación, catastrofismo e intentos de corrección. *Investigaciones Geográficas*, (23), 5-46. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17602301

Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European Water* 23(24), 67–77. Recuperado de https://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2008_23-24_06.pdf

Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897. DOI: 10.1007/s11269-008-9305-1

Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., & Giovannini, E. (2005). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide, OECD Statistics Working Paper, STD/DOC (2005)3*. Paris, France: OECD Publishing. Recuperado de http://www.oecd.org/els/soc/handbookonconstructingcompositeindicatorsmethodologyanduserguide.htm

Neri, C., & Magaña, V. (2016). Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95-110. Recuperado de https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/8/2/wcas-d-15-0005_1.xml

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Norma Mexicana (NMX-AA-028-SCFI-2001). (2001). *Análisis de agua, determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO_5) y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981)*. Recuperado de http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf

Norma Mexicana (NMX-AA-034-SCFI-2015). (2015). *Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba (cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001)*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf

Ortega-Gaucin, D. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación.* Apodaca, México: Instituto del Agua del Estado de Nuevo León (IANL). DOI: 10.13140/RG.2.1.1426.0563.

Ortega-Gaucin, D., & Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-lac*, 5(2), 78-90. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/06/Aspectos_socioeconomicos_y_ambientales_de_las_sequias_en_Mexico.pdf

Ortega-Gaucin, D., De la Cruz-Bartolón, J., & Castellano-Bahena, H. V. (2018). Drought vulnerability indices in México. *Water*, 10(11), 1671. MDPI AG. DOI: 10.3390/w10111671

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Ortega-Gaucin, D., Ceballos-Tavares, J. A., Ordoñez, A., & Castellano-Bahena, H. V. (2021). Agricultural drought risk assessment: A spatial analysis of hazard, exposure, and vulnerability in Zacatecas, Mexico. *Water*, 13(10), 1431. DOI: 10.3390/w13101431

Pacheco-Vega R. (2014). Intermunicipalidad como un arreglo institucional emergente: el caso del suministro de agua en la zona metropolitana de Aguascalientes, México. *Revista de Gestión Pública*, 3(2), 207-234. DOI: 10.22370/rgp.2014.3.2.2241

Patnaik, U., & Narayanan, K. (2009). *Vulnerability and climate change: An analysis of the eastern coastal districts of India* (MPRA Paper No. 22062). Munich, Germany: Munich Personal RePEc Archive, Munich University.

Pérez, A., & Mas, F. (2009). Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. *Investigaciones Geográficas*, (69), 53-67. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000200005&lng=es&tlng=es

Perló, M., & González, E. (2005). *¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudios sobre las relaciones hidráulicas en el Distrito Federal y el Estado de México*. México, DF, México: Coordinación de Humanidades, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad-UNAM, Fundación Friedrich Ebert Stiftung. Recuperado de http://centro.paot.org.mx/documentos/unam/guerra_por_agua_digital.pdf

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Pértegas, S., & Pita, S. (2001). Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal de Pearson. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complexo Hospitalario Juan Canalejo. A Coruña (España):cad aten primaria 2001;2002; 9: 209-211. Recuperado de https://www.fisterra.com/formacion/metodologia-investigacion/determinacion-tamano-muestral-para-calcular-significacion-coeficiente-correlacion-lineal/

Peters, E., Campoy-Favela, J., & Flessa, K. (2009). *Ciénega de Santa Clara comprehensive monitoring program*. México, DF, México: publicación especial del Instituto Nacional de Ecología.

Pineda-Pablos, N., & Salazar-Adams, A. (2016). Ciudades y sequía en México. La gestión del agua como estrategia crítica de mitigación. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 95-113. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500095&lng=es&tlng=es

Raffestin, C. (1993). *Por uma geografía do poder*. São Paulo, Brasil: Editora Ática.

Ramírez, M. (21 de abril, 2021). Sequía en Jalisco viola el derecho humano al acceso al agua asegura especialista. *Milenio*. Recuperado de https://www.milenio.com/politica/comunidad/sequia-jalisco-viola-derecho-humano-acceso-agua-udeg

Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/267205556

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Romero-Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería del trabajo*, 6(3), 105-114. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043

Rocha, E. (2010). *Parámetros y características de las aguas naturales. Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de aguas*. Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua.

SADM, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. P. D. (2010). *Informe de actividades 2003-2009*. Recuperado de https://pfiles.sadm.gob.mx/Pfiles/Uploads/Documentos/175.pdf

SADM, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. P. D. (2013). *Informe de resultados 2013*. Recuperado de https://pfiles.sadm.gob.mx/Pfiles/Uploads/Documentos/206.pdf

SADM, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. P. D. (2014). *Informe de resultados 2014*. Recuperado de https://pfiles.sadm.gob.mx/Pfiles/Uploads/Documentos/207.pdf

SADM, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. P. D. (2015). *Dictamen de la revisión de la cuenta pública 2015*. Recuperado de https://www.asenl.gob.mx/cta_publica/pdf/2015/organismos/Informe_2015_ServiciosAguayDrenaje.pdf

SADM, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. P. D. (2017). *Resultados de la evaluación de desempeño. Cuenta pública 2017*. Recuperado de https://www.asenl.gob.mx/cta_publica/pdf/2017/organismos/Informe_Servicios_de_Agua_y_Drenaje_Desempeno.pdf

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Saltelli, A., Ratto, M., Andrés, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis. The Primer*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd. DOI: 10.1002/9780470725184

Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Manifiesto de impacto ambiental modalidad particular que se presenta para el proyecto relacionado con un parque recreativo en un predio ubicado dentro de los límites de la presa Cerro Prieto en el municipio de Linares, Nuevo León municipio de Monterrey, Nuevo León*. Recuperado de http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/nl/estudios/2011/19NL2011UD034.pdf

Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

Sena, A., Ebi, K. L., Freitas, C., Corvalan, C., & Barcellos, C. (2017). Indicators to measure risk of disaster associated with drought: Implications for the health sector. *PloS One*, 12(7), e0181394. DOI: 10.1371/journal.pone.0181394

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

SEAPAL, Sistema de los Servicios de Agua Potable, Drenaje y Alcantarillado de Puerto Vallarta. (2019). *Vallartenses refrendan su confianza en SEAPAL*. Recuperado de http://www.seapal.gob.mx/vallartenses-refrendan-su-confianza-en-seapal-registra-99-2-de-eficiencia-comercial/

Sedesol, Secretaría de Desarrollo Social. (2010). *Huracán Alex en Nuevo León, la memoria. Riesgos, testimonios y acción social*. Monterrey, México: Unidad de Planeación, Investigaciones y Diagnósticos de Desarrollo Social 2009-2015, Gobierno del Estado de Nuevo León. Recuperado de http://www.nl.gob.mx/publicaciones/huracan-alex-en-nuevo-leon-la-memoria-riesgos-testimonios-y-accion-social

Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3/4), 591-611. DOI: 10.2307/2333709

SIAPA, Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado. (2010). *Informe de actividades y resultados enero-diciembre 2010 del SIAPA*. Guadalajara, México: Gobierno del Estado de Jalisco.

SIAPA, Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado. (2017). *Informe de actividades y resultados enero-diciembre 2017 del SIAPA*. Recuperado de https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/doctrans/informe_de_actividades_-_anual_2017.pdf

SIAPA, Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado. (2018). *Informe de actividades y resultados enero-diciembre 2018 del SIAPA*. Recuperado de https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/doctrans/informe_anual_2018.pdf

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: A software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8, 697-709. DOI: 10.1007/s12145-014-0178-y

Torres, P., Cruz, C., & Patiño, P. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94. Recuperado de https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/59

Torres, M., & Barajas, L. (2013). *Descripción de la cuenca hidrográfica del río San Juan, presa La Boca-presa El Cuchillo, Nuevo León, México, Monterrey*. Recuperado de https://docplayer.es/20730632-Descripcion-de-la-cuenca-hidrografica-del-rio-san-juan-presa-la-boca-presa-el-cuchillo-nuevo-leon-mexico.html

Torres-Lima, P. (2015). *Ecourbanismo y habitabilidad regional. Contribuciones de América Latina*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/291345490_Ecourbanismo_y_habitabilidad_regional_Contribuciones_de_America_Latina

Tsakiris, G. (2007). Practical application of risk and hazard concepts in proactive planning. *European Water*, 19(20), 47-56. Recuperado de https://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2007_19-20_05.pdf

UNDRO, United Nations Disaster Relief Organization. (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis. Report of experts group meeting*. Recuperado de https://digitallibrary.un.org/record/95986?ln=es

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

UNCCD, United Nations Convention to Combat Desertification. (2013). Economic and social impacts of desertification, land degradation and drought. In: *White paper I, UNCCD 2nd Scientific Conference. Prepared with the contributions of an international group of scientists*. Recuperado de https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b4a74a3888c708f886a5ed7fbdd519f03b41271d

Welle, T., & Birkmann, J. (2015). The World Risk Index – An approach to assess risk and vulnerability on a global scale. *Journal of Extreme Events*, 2(1). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/283087679_The_World_Risk_Index_An_Approach_to_Assess_Risk_and_Vulnerability_on_a_Global_Scale

Wilhite, D. A. (2000). Chapter 1 drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In: Wilhite, D. (ed.). *Drought: A global assessment*. Vol. I (pp. 3-18). London, UK: Routledge. Recuperado de https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1068&context=droughtfacpub

Wise, S. (2000). Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours, *Hydrological Processes*, (14), 1909-1929. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<1909::AID-HYP45>3.0.CO;2-6

Zaiontz, C. (2024). *Real statistics using Excel*. Recuperado de https://real-statistics.com/

2025, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)