Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2026,
Volumen 10, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5

CARACTERIZACIÓN HISTÓRICA Y PRONÓSTICO DE SEQUÍA EN LAS SUBCUENCAS DEL VALLE DEL MEZQUITAL (1990–2050)

HISTORICAL CHARACTERIZATION AND FORECASTING OF DROUGHT IN THE SUB-BASINS OF THE MEZQUITAL VALLEY (1990–2050)

Raúl Escalante-Notario
Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

Hipólito Muñoz Nava
Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

Silvia Chamizo Checa
Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

Elena María Otazo Sánchez
Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo

Jorge Luis Yáñez Hernández
Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

Juan Suárez Sánchez
Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5.26214

Caracterización Histórica y Pronóstico de Sequía en las Subcuencas del Valle del Mezquital (1990–2050)

Raúl Escalante-Notario[1]
20254409@uatx.mx
https://orcid.org/0009-0008-7189-9128
Facultad de Agrobiología. Universidad Autónoma de Tlaxcala

Hipólito Muñoz Nava
hipolito78@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8792-2208
Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala

Silvia Chamizo Checa
silvia.chamizo.c@uatx.mx
https://orcid.org/0000-0002-8750-6615
Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala

Elena María Otazo Sánchez
elenamariaotazo@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9324-8926
Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo

Jorge Luis Yáñez Hernández
joorgee@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0004-8910-4953
Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala

Juan Suárez Sánchez
lab.recursos.naturales@uatx.mx
https://orcid.org/0000-0002-9127-7413
Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala

RESUMEN

Este estudio evalúa la vulnerabilidad hidroclimática y las tendencias de la sequía meteorológica en las subcuencas del Valle del Mezquital, con el propósito de fortalecer la alerta temprana y la gestión integrada del agua. Para ello, se homogeneizaron series históricas de precipitación mensual de diecinueve estaciones climatológicas y se determinó el Índice Estandarizado de Precipitación e integrándolo a nivel de subcuenca mediante polígonos de Thiessen. También se empleó un modelo de suavizado exponencial para pronosticar la tendencia inercial del índice a largo plazo y se utilizó la interpolación por distancia inversa para mapear la redistribución espacial del riesgo. Los resultados mostraron una estabilidad histórica representada por valores normales con orientación negativa, alterada recientemente por eventos secos extremos y excepcionales. El modelo predictivo fue útil para aislar la variabilidad interanual y pronosticar tendencias a largo plazo, y mostró un descenso progresivo de la precipitación que conducirá a la mayoría de las subcuencas a condiciones de sequía moderada y severa hacia mediados de siglo. En conclusión, la investigación demostró una reconfiguración territorial del déficit pluvial, en la que las zonas históricamente húmedas pasarán a condiciones de sequía en el norte, el centro y el sur de la región. Este patrón intensificará la presión sobre la extracción de agua subterránea, lo que afectará las actividades agropecuarias, y demostrará la necesidad de implementar estrategias de planificación sustentable ante el incremento sostenido de la aridez.

Palabras clave: Índice estandarizado de precipitación, vulnerabilidad hidroclimática, suavizado exponencial, interpolación espacial

[1] Autor principal
Correspondencia: silvia.chamizo.c@uatx.mx

Historical characterization and forecasting of drought in the sub-basins of the Mezquital Valley (1990–2050)

ABSTRACT

This study evaluated the hydroclimatic vulnerability and meteorological drought trends in the sub-basins of the Mezquital Valley to strengthen early warning systems and integrated water resources management. To achieve this, quality control and homogenization were applied to the historical monthly precipitation series from nineteen climatological stations, calculating the Standardized Precipitation Index and integrating it at the sub-basin level using Thiessen polygons. Likewise, an exponential smoothing model was used to forecast the long-term inertial trend of the index, and inverse distance weighting interpolation was employed to map the spatial redistribution of risk. The results showed historical stability represented by normal values with a negative trend, which has been recently altered by extreme and exceptional dry events. The predictive model proved suitable for isolating interannual variability and forecasting long-term trends, determining a progressive decline in precipitation that will lead most sub-basins toward moderate and severe drought conditions by mid-century. In conclusion, the research demonstrated a territorial reconfiguration of the rainfall deficit, where historically humid areas will shift into dry cores in the north, center, and south of the region. This pattern will intensify pressure on groundwater extraction and impact agricultural activities, reaffirming the need to implement sustainable planning strategies in the face of a sustained increase in aridity.

Keywords: Standardized precipitation index, hydroclimatic vulnerability, exponential smoothing, spatial interpolation

Artículo recibido 12 septiembre 2026
Aceptado para publicación: 15 octubre 2026

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son sistemas naturales clave que sostienen el equilibrio ecológico y suministran servicios ecosistémicos fundamentales para el desarrollo socioeconómico humano (Muñoz *et al*., 2025). Al ser sistemas dinámicos, interactúan con el suelo, el agua y el conjunto de organismos vivos de la zona. La gestión integral de estos sistemas permite equilibrar los diversos usos de la tierra articulando la conservación ambiental con el desarrollo sostenible. Este enfoque coordinado actúa como un nexo fundamental para resolver las complejas interdependencias ecológicas, sociales y económicas en un territorio determinado (Zerga, 2025).

La sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas, caracterizadas por precipitaciones escasas e información hidrométrica limitada, depende de comprender el ciclo hidrológico local mediante el análisis del proceso de captación y la dinámica de lluvia-escorrentía (Soomro et al., 2026). En estos entornos, la variabilidad climática condiciona un régimen pluviométrico irregular que determina una dinámica hidrológica fuertemente contrastante entre avenidas y estiajes prolongados, patrón típico de las cuencas áridas. Ante dicha variabilidad, las cabeceras de cuenca resultan críticas para amortiguar el impacto climático mediante el almacenamiento natural, la infiltración y la regulación de la escorrentía (Bernal y Vizcarra, 2026).

Las sequías son eventos climáticos periódicos caracterizados por falta de agua y precipitaciones escasas (Khan *et al*., 2025), cuya frecuencia e intensidad se ven agravadas por el cambio climático al modificar las temperaturas y la evaporación (Liang *et al*., 2026). Dado que la variación climática y las actividades humanas constituyen los factores más influyentes en la cantidad y calidad del agua, afectando el abastecimiento hídrico y la dinámica de los ecosistemas, resulta necesario integrar las actividades socioeconómicas de la cuenca en el paradigma de estudio de los procesos ecohidrológicos (Cao *et al*., 2022).

En el Valle del Mezquital, la presión sobre los recursos hídricos se ha agudizado debido a la sobreexplotación de los acuíferos, el uso intensivo del agua en la agricultura e industria, y la degradación de su calidad por descargas residuales (Marín *et al*., 2019; Chamizo-Checa *et al*., 2020; Hernández-Espinosa *et al*., 2024). Esta situación se complica por la ocurrencia de sequías derivadas de una marcada irregularidad pluvial, donde las lluvias escasas y altamente variables limitan la recarga natural de las

fuentes subterráneas. Así, el déficit hídrico persistente, articulado con la sobreexplotación y la continua dependencia de aguas residuales, acentúa la degradación ambiental, la pérdida de biodiversidad y la vulnerabilidad socioeconómica en la región.

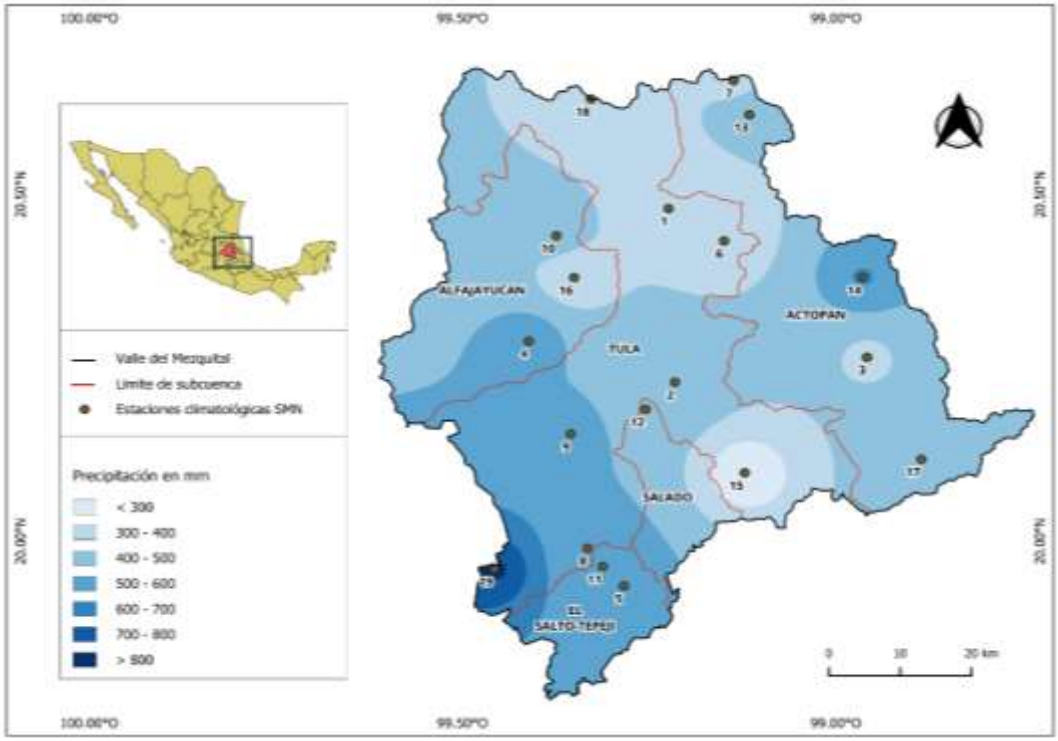
Ante los riesgos que la irregularidad pluvial representa para la seguridad hídrica del Valle del Mezquital, este estudio caracteriza la variabilidad de la precipitación y la dinámica de los eventos secos (frecuencia, duración e intensidad) en las subcuencas de Actopan, Alfajayucan, El Salto-Tepeji, Salado y Tula. A partir del Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) correspondiente al periodo histórico 1990-2025, se evaluaron las tendencias de la sequía hacia el horizonte 2026-2050, mediante un modelo de suavizado exponencial (ETS/Holt-Winters). El aporte del estudio radica en generar líneas de base confiables y un modelo prospectivo replicable, orientados a fortalecer la alerta temprana, la planificación territorial y gestión sustentable del recurso hídrico de la región.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El Valle del Mezquital (Hidalgo, México) es una región semiárida de 4853.49 km². Está integrado por cinco subcuencas: Tula (2166.78 km²), Actopan (1300.95 km²), Alfajayucan (842.78 km²), El Salto-Tepeji (297.44 km²) y Salado (245.54 km²). Predomina el clima semiseco con temperatura media de 18 °C y precipitación anual entre 400 y 600 mm (Figura 1) (Contreras *et al*., 2025). A pesar de su relevancia agrícola y socioeconómica, la región enfrenta una severa crisis hídrica por la sobreexplotación de acuíferos, la demanda intensiva del sector agroindustrial y la contaminación por aguas residuales (Marín *et al*., 2019; Chamizo-Checa *et al*., 2020; Hernández-Espinosa *et al*., 2024).

Figura 1. Ubicación geográfica, distribución de la red de estaciones climatológicas y distribución espacial de la precipitación media anual en las subcuencas del Valle del Mezquital, Hidalgo, México.



Determinación de la sequía

Para caracterizar la sequía en la zona de estudio, se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) propuesto por McKee *et al*. (1993), que permite medir la severidad de la sequía durante un periodo de tiempo, empleando series mensuales continuas de precipitación de por lo menos 30 años (Esquivel-Arriaga *et al*., 2019). Se evaluaron escalas acumuladas de 12 meses para reflejar el impacto de los déficits de lluvia. El cálculo mensual consistió en ajustar los datos a una función de probabilidad Gamma, que posteriormente se transformaron mediante la distribución normal estándar inversa. El valor resultante es un índice estandarizado ($\mu=0$, $\sigma=1$), cuyas intensidades de sequía se categorizaron según la clasificación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Tabla 1). El cálculo del IEP en escala de 12 meses (IEP-12) para evaluar la sequía se implementó en R/R-Studio utilizando el paquete oficial SPEI (Montes-Vega *et al.,* 2023; Méndez *et al*., 2025).

Tabla 1. Clasificación de las categorías de sequía y humedad según los rangos del Índice Estandarizado de Precipitación (IEP)

Valores de IEP	Categoría de sequía
> 2.00	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco
-1.50 a -1.99	Severamente seco
< -2.00	Extremadamente seco

Fuente: Adaptado de Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Conjuntos de datos de precipitación

La Tabla 2, detalla las 19 estaciones climatológicas distribuidas en la zona de estudio. Los datos de precipitación mensual acumulada (1990–2025) se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2026). Para cumplir con los criterios de la Organización Meteorológica Mundial, se seleccionaron estaciones con un registro mínimo de 30 años y una disponibilidad de datos continuos superior al 80 % durante el periodo de análisis.

Tabla 2. Ubicación geográfica, elevación y periodo de registro de las estaciones climatológicas seleccionadas

ID Mapa	Estación	Código SMN	Periodo	Altitud (m)	Latitud (° decimales)	Longitud (° decimales)
1	Ixmiquilpan	13013	1990-2025	1702	20.480	-99.224
2	Mixquiahuala	13018	1990-2025	2004	20.229	-99.215
3	Actopan	13060	1990-2025	2016	20.265	-98.958
4	Chapantongo	13064	1990-2025	2122	20.289	-99.411
5	Salto	13068	1990-2025	2178	19.936	-99.284
6	Mezquital	13069	1990-2025	1810	20.433	-99.149
7	Santuario	13070	1990-2025	2297	20.664	-99.137
8	Jasso	13075	1990-2025	2061	19.990	-99.332
9	Endhó	13080	1990-2025	2035	20.155	-99.355
10	Golondrinas	13081	1990-2025	1876	20.441	-99.374
11	Requena	13084	1990-2025	2123	19.964	-99.312
12	Salado	13090	1990-2025	1993	20.190	-99.255
13	Cardonal	13105	1990-2025	2043	20.615	-99.116
14	E.T.A	13109	1990-2025	2029	20.381	-98.964
15	Ajacuba	13111	1990-2025	2139	20.099	-99.122
16	Alfajayucan	13125	1990-2025	1930	20.380	-99.350
17	Ocavm	13128	1990-2025	2355	20.118	-98.885
18	Xithá	13148	1990-2025	2040	20.639	-99.328
19	Banco	13149	1990-2025	2369	19.960	-99.457

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.

Homogeneización de los datos de precipitación

Para garantizar la validez de los resultados y corregir errores por fallas en sensores, transcripción, captura o reubicación de estaciones, las bases de datos de precipitación se sometieron a control de calidad, homogeneización y relleno de datos faltantes siguiendo la metodología desarrollada por Guijarro (2018). Este procedimiento se ejecutó con el paquete *Climatol* (versión 3.1.1) en R, conforme a lo implementado recientemente por Pita-Díaz y Ortega-Gaucin (2020) y Cruz-González *et al*. (2023).

Ponderación del IEP por subcuenca

En la gestión de cuencas, los datos puntuales de las estaciones meteorológicas requieren un procedimiento de regionalización para obtener representatividad espacial continua. Para integrar el IEP a nivel de subcuenca, el índice se obtuvo primero por estación y posteriormente se agregó mediante polígonos de Thiessen. Este método determina el valor medio del IEP asignando a cada estación climatológica un peso proporcional a su área de influencia en una red de polígonos trazada mediante mediatrices entre estaciones adyacentes. Dicha metodología preserva las anomalías y extremos climáticos locales en regiones heterogéneas, evitando la subestimación de eventos críticos en el análisis de riesgo territorial (Juliani y Okawa 2017; Song y Park, 2021).

La delimitación de las áreas de influencia de las 19 estaciones de las cinco subcuencas se realizó en QGIS. Los coeficientes de ponderación espacial obtenidos se aplicaron a los valores mensuales del IEP calculados en R, generando las series temporales integradas por subcuenca.

Pronóstico del IEP mediante suavizado exponencial

El modelo de Suavizado Exponencial en Espacio de Estados (ETS, por sus siglas en inglés) es un marco estadístico que descompone series temporales en nivel, tendencia y estacionalidad, asignando pesos exponencialmente decrecientes a las observaciones pasadas. Mediante tres parámetros de suavizado, nivel (α), tendencia (β) y estacionalidad (γ), el método Holt-Winters aditivo, o suavizado exponencial triple, ajusta la serie en cada periodo (Hyndman y Athanasopoulos, 2018), lo que permite capturar dinámicas complejas y tendencias en índices como el IEP (Raha y Gayen, 2020; Tihi y Popov, 2023).

El sistema se compone de una ecuación de observación (pronóstico a m periodos) y tres ecuaciones de estado (nivel ℓ_t, tendencia b_t y estacionalidad s_t):

Observación: $\hat{Y}_{t+m|t} = \ell_t + mb_t + s_{t+m-M(k+1)}$

Nivel: $\ell_t = \alpha(Y_t - s_{t-M}) + (1-\alpha)(\ell_{t-1} + b_{t-1})$

Tendencia: $b_t = \beta(\ell_t - \ell_{t-1}) + (1-\beta)b_{t-1}$

Estacionalidad: $s_t = \gamma(Y_t - \ell_{t-1} - b_{t-1}) + (1-\gamma)s_{t-M}$

Donde Y_t es el valor observado y M representa la longitud del ciclo estacional, y α, β, γ ∈ [0,1] son los parámetros de suavizado estimados mediante la minimización del error de pronóstico.

La modelación predictiva se estructuró en dos etapas utilizando la herramienta de previsión de Microsoft Excel, con un intervalo de confianza del 95%. En la fase de validación retrospectiva, el modelo se entrenó con la serie 1990-2020 para evaluar su desempeño predictivo frente a las observaciones de 2021-2025 mediante las siguientes métricas: el Error Escalado Absoluto Medio (MASE), que mide la precisión respecto a un modelo de referencia; el Error Absoluto Medio (MAE), que cuantifica la desviación promedio absoluta; y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), que penaliza los errores de mayor magnitud e identifica las subcuencas con mayor incertidumbre. En la fase de pronóstico, el modelo se reentrenó con la serie histórica completa (1990-2025) para prever el IEP-12 en el periodo 2026-2050. En ambos casos, los parámetros α y β se optimizaron automáticamente, mientras que γ se fijó en 0.00 debido a la naturaleza anual acumulada del índice.

Análisis espacial del IEP

Para mapear el comportamiento del IEP histórico y pronosticado en la zona de estudio para los horizontes 2025 y 2050, se empleó el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW, por sus siglas en inglés) en QGIS, utilizando la configuración predeterminada del software. Como método determinista de interpolación espacial, el IDW se emplea con frecuencia en el mapeo de índices de sequía gracias a su efectividad con redes de estaciones densas o limitadas. Su idoneidad radica en su sencillez de implementación, eficiencia computacional y capacidad para generar resultados consistentes (Tsesmelis *et al*., 2023; Jahangir *et al*., 2026).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización histórica del IEP-12 por subcuenca (1990-2025)

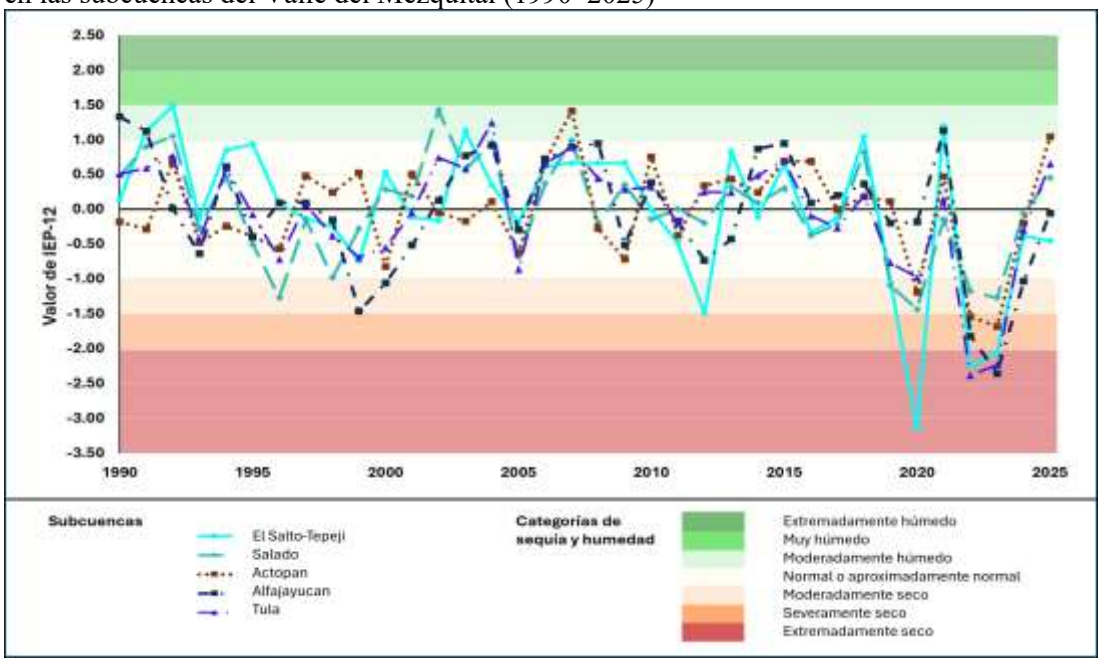
El análisis de la serie histórica del IEP-12 de 1990-2025 en el Valle del Mezquital (Figura 2) muestra una estabilidad predominante en la precipitación a largo plazo, concentrándose en el rango de normalidad (-0.99 a 0.99) con frecuencias entre 72 % (El Salto-Tepeji) y 92 % (Tula). No obstante, la distribución exhibe un sesgo constante hacia la franja neutra negativa (0.00 a -0.99), indicando un estado basal orientado hacia el déficit hídrico. Durante las primeras décadas, se observó una alternancia de eventos húmedos destacando El Salto-Tepeji en 1992 (1.49), Salado en 2002 (1.43), Tula en 2004 (1.25) y Actopan en 2007 (1.42) con periodos secos moderados en 1996, 1999, 2000 y 2012. La persistencia histórica en valores neutros-negativos refleja un estado basal de aridez latente en el territorio, el cual coincide con el incremento generalizado en la tendencia e intensidad de la aridez reportado para los ecosistemas de México (López-Teloxa et al., 2026).

El comportamiento del régimen pluviométrico se alteró a partir de 2019, cuando episodios de sequía extrema (IEP-12 < -2.0) representaron severas desviaciones puntuales en la región. En la subcuenca El Salto-Tepeji se registró el evento más crítico del registro con una sequía extrema en 2020 (-3.14), seguida por déficit severo en 2022 (-2.25) y 2023 (-2.06). La subcuenca Salado mantuvo una fase prolongada de escasez entre 2019 y 2023, alcanzando picos secos en 2020 (-1.43) y 2023 (-1.27), mientras que Actopan atravesó un trienio seco continuo (2020-2023) con valores severos en 2022 (-1.54) y 2023 (-1.68), antes de recuperarse hacia 2025 (1.04). Por su parte, Alfajayucan y Tula experimentaron su mayor estrés hídrico durante el periodo 2022-2024; Alfajayucan paso de una sequía severa en 2022 (-1.82) a un máximo extremo en 2023 (-2.35), concluyendo en 2024 (-1.03), en tanto que Tula registró un evento inédito de sequía extrema consecutiva en 2022 (-2.38) y 2023 (-2.24), constituyendo el mayor déficit acumulado de la serie histórica.

La drástica variación observada a partir de 2019 se alinea con la mayor variabilidad y frecuencia de eventos extremos documentada en la región central del país (Magallanes-Quintanar *et al.,* 2022; Pita-Díaz y Ortega-Gaucin, 2020). Este patrón de intensificación del déficit pluviométrico se encuentra estrechamente vinculado a forzamientos multianuales como el fenómeno El Niño (ENSO), cuyas fases

cálidas suelen intensificar la escasez de lluvia e impactar la disponibilidad hídrica en el estado de Hidalgo y cuencas aledañas (Esquivel-Arriaga *et al*., 2019; Quiróz-Jiménez *et al*., 2023).

Figura 2. Evolución temporal del Índice Estandarizado de Precipitación a escala de 12 meses (IEP-12) en las subcuencas del Valle del Mezquital (1990–2025)



Evaluación y validación del Modelo ETS (2021-2025)

El modelo ETS se evaluó como herramienta de pronóstico inercial para el IEP-12 a largo plazo. Durante la validación retrospectiva (2021-2025), las estimaciones se mantuvieron dentro del intervalo de confianza del 95 % en la mayoría de las subcuencas, registrando valores inferiores a la unidad en la métrica de referencia MASE (<1.0) y un RMSE (0.51 - 0.63).

La optimización de parámetros (β=0.00, γ=0.00) derivó en un Suavizado Exponencial Simple, donde los valores de α (0.00 - 0.50) asignaron mayor peso al registro histórico de 36 años. Esta configuración atenuó la sensibilidad del modelo ante variaciones extremas, aunque registró un incremento en los indicadores de error en El Salto-Tepeji (MASE = 1.56; RMSE = 1.22), resultado de la oscilación entre el valor de 2020 (-3.14) y la lectura de 2021 (1.20).

El margen de error obtenido en los valores de MAE (0.41 - 0.47) equivale a la amplitud de una categoría del índice. Esta magnitud de desviación restringe la precisión del modelo para estimar valores anuales específicos a corto plazo; sin embargo, permite aislar la variabilidad interanual para pronosticar la

tendencia general del IEP-12 a largo plazo, proporcionando una línea de base inercial para la planificación hídrica.

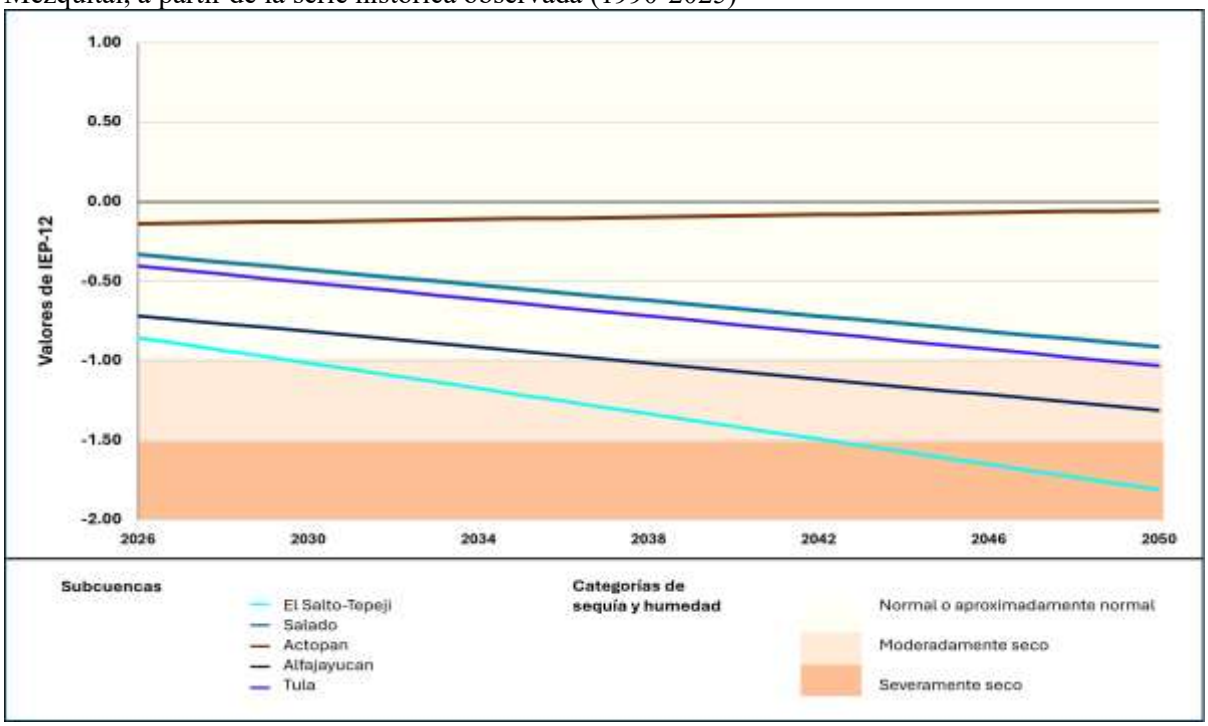
Pronóstico de la sequía a largo plazo (2026-2050)

El pronóstico del modelo de suavizado exponencial para el horizonte temporal 2026–2050 (Figura 3) reflejan dinámicas pluviométricas contrastantes, prevé un escenario hidrológico caracterizado por la prevalencia de trayectorias inerciales y un predominio generalizado de condiciones normales a moderadamente secas.

El comportamiento de la subcuenca Actopan exhibe neutralidad hídrica a largo plazo con una trayectoria horizontal cercana a cero (-0.14) en 2026 a (0.00) en 2050, tras el pico húmedo de 2025 (1.04), las cuatro subcuencas restantes muestran tendencias decrecientes en la precipitación. Salado desciende de forma paulatina dentro del rango de normalidad, pasa de -0.33 en 2026 a -0.91 en 2050, aproximándose al umbral de sequía moderada sin retorno a condiciones húmedas. En contraste, Alfajayucan y Tula consolidan un déficit hídrico al ingresar progresivamente a sequía moderada hacia los años 2038 (-1.02) y 2049 (-1.01), concluyendo el horizonte de estudio con valores de -1.31 y -1.03 en 2050, respectivamente. Por su parte, la subcuenca El Salto-Tepeji presenta el pronóstico más severo, partiendo de -0.86 en 2026, alcanza sequía moderada en 2030 (-1.02) y evoluciona de manera continua hasta registrar un estado de sequía severa en 2050 (-1.81).

En conjunto, las estimaciones confirman la intensificación sostenida del estrés hídrico en la mayor parte de las subcuencas estudiadas. La capacidad de los modelos de suavizado exponencial para simular esta degradación inercial concuerda con lo reportado por Raha y Gayen (2020) y Tihi y Popov (2023), quienes validan la efectividad de estas técnicas para capturar tendencias de sequía meteorológica en horizontes de mediano y largo plazo. Asimismo, la trayectoria descendente prevista hacia 2050 resulta coherente con los escenarios climáticos CMIP6 evaluados para la cuenca del Pánuco y el territorio nacional, los cuales prevén un incremento sostenido en la severidad y duración de los déficits de precipitación (Velázquez-Zapata y Dávila-Ortiz, 2025).

Figura 3. Pronóstico del IEP-12 (2026-2050) mediante el modelo ETS en las subcuencas del Valle del Mezquital, a partir de la serie histórica observada (1990-2025)



Comportamiento espacial de la sequía (2025 vs. 2050)

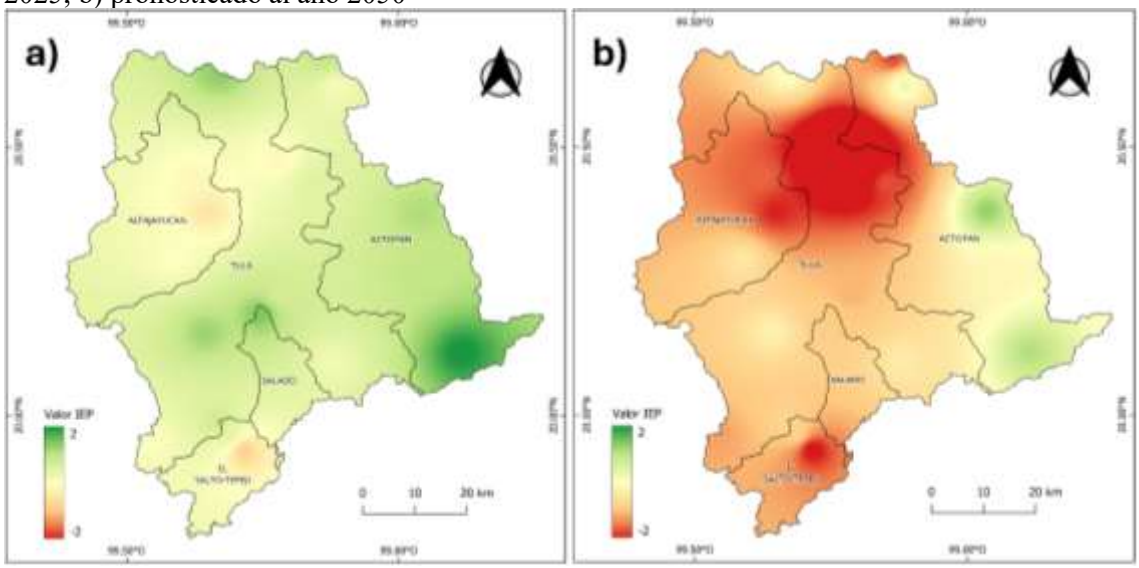
La integración de ambos horizontes temporales del IEP evidencia una clara redistribución del riesgo hídrico en el Valle del Mezquital, zonas antes normales o húmedas en 2025, como el centro y el norte de la región, pasarán a enfrentar déficit hídrico en 2050, planteando nuevos desafíos para la gestión sostenible bajo la variabilidad implícita del modelo.

En 2025 (Figura 4a), el Valle del Mezquital exhibió condiciones pluviométricas favorables caracterizadas por valores normales a moderadamente húmedos del IEP en la mayoría de las subcuencas, alcanzando máximos de humedad (valores cercanos a 2.00) en el oriente de Actopan, parte de Salado y Tula. A diferencia de la subcuenca El Salto-Tepeji y sectores de Alfajayucan y Tula que registró ligeros matices de déficit hídrico. Para 2050 (Figura 4b), la distribución espacial del IEP revela un comportamiento espacial dominado por una transición generalizada hacia la aridez. La intensidad de la sequía adquiere una clara polarización geográfica, las subcuencas de Tula, Alfajayucan y el norte de Actopan, transitan hacia niveles de sequía severa a extrema (IEP cercano a -2.00), constituyendo el núcleo más vulnerable del territorio. Paralelamente, la subcuenca El Salto-Tepeji en el sur consolida un

foco secundario de sequía severa. En contraste, únicamente la franja oriental de Actopan conserva condiciones normales a moderadamente húmedas.

La redistribución del riesgo espacial concuerda con lo planteado por Tsesmelis *et al.* (2023) sobre la variabilidad espaciotemporal que caracteriza al IEP al ser aplicado a escala regional. Asimismo, este pronóstico tendencial tiene implicaciones socioeconómicas y ambientales. Pese a que la región depende estructuralmente de los volúmenes de aguas residuales exportados desde la Zona Metropolitana del Valle de México para sostener su sistema agrícola (García-Salazar, 2019; Hernández-Espinosa *et al*., 2024; Rosas-Baños y García-Salazar, 2024), el aumento pronosticado en la sequía meteorológica incrementará la presión sobre la extracción de los acuíferos subterráneos (Téllez *et al*., 2026), amenazando la rentabilidad agrícola y la seguridad hídrica regional (Tapia y Mendoza, 2025; Santacruz-De León *et al*., 2022). Dichos hallazgos acentúan la necesidad de implementar estrategias de gestión integrada de cuencas que permitan amortiguar los efectos de la aridez inercial en el horizonte 2026–2050 (Zerga, 2025).

Figura 4. Distribución espacial del IEP en las subcuencas del Valle del Mezquital: a) histórico al año 2025; b) pronosticado al año 2050



CONCLUSIONES

Se evaluó la vulnerabilidad del Valle del Mezquital ante la sequía para prevenir riesgos futuros por subcuenca. La metodología ofreció una herramienta replicable para la gestión sustentable y la alerta temprana. El Índice Estandarizado de Precipitación mostró periodos normales históricos con sesgo

negativo. Sin embargo, en los años recientes la escasa precipitación y las sequías intensas confirmaron un clima cada vez más seco. El modelo de suavizado exponencial demostró ser adecuado para calcular la tendencia a futuro. Su configuración permitió suavizar cambios repentinos de un año a otro para enfocarse en el comportamiento a largo plazo.

El pronóstico determinó que la falta de lluvia se incrementará con los años. Salvo una subcuenca que mantuvo condiciones de neutralidad, la mayor parte del territorio pasará gradualmente de condiciones normales hacia fases de sequía. La cartografía evidenció una reconfiguración territorial del déficit de lluvia. Las zonas donde existían regímenes de lluvia superiores a 400 mm al año se volverán secas, lo que incrementará la presión sobre los acuíferos para sostener las actividades regionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernal, V. R. A. y Vizcarra, S. L. M. (2026). Dinámica Hidrológica del Río Osmore en Periodos de Estiaje y Avenida. *Tecnohumanismo*, *100*(1), 358–375. https://doi.org/10.53673/th.v100i1.561

Cao, Z., Wang, S., Luo, P., Xie, D., y Zhu, W. (2022). Watershed Ecohydrological Processes in a Changing Environment: Opportunities and Challenges. *Water*, *14*(9), 1502. https://doi.org/10.3390/w14091502

Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A., Suárez-Sánchez, J., González-Ramírez, C., y Muñoz-Nava, H. (2020). Megacity Wastewater Poured into A Nearby Basin: Looking for Sustainable Scenarios in A Case Study. *Water,* 12(3), 824. https://doi.org/10.3390/w12030824

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2026). Información Estadística Climatológica. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica. Fecha de consulta: 10 de junio de 2026.

Contreras, L. C., Rodríguez, A. R., Ramírez, G. M. G., y Beltrán, M. Y. S. (2025). Caracterización del territorio en el noreste del Valle del Mezquital con una metodología de análisis ambiental. En Escobar, L. M. C., Cano, A. A. y Ortega, E. L. E. (Ed.). Ambiente y vida en los desiertos mexicanos exploraciones sobre la producción del espacio (pp. 187-227). Universidad Autónoma de Zacatecas.

Cruz-González, A., Arteaga-Ramírez, R., Sánchez-Cohen, I., Soria-Ruiz, J., Monterroso-Rivas, A. I., y Flores-Magdaleno, H. (2023). Tendencia y variabilidad climática: Efecto en la producción de

maíz en el Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *10*(NEIII). https://doi.org/10.19136/era.a10nNEIII.3868

Esquivel-Arriaga, G., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., Flores-López, F., y Bueno-Hurtado, P. (2019). Análisis temporal de sequías (1922-2016) en la cuenca alta del río Nazas usando el SPI y su relación con ENSO. *Tecnología y ciencias del agua*, *10*(5), 126-153. https://doi.org/10.24850/j-tyca-imta

García-Salazar, E. M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, *29*(54). https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741

Guijarro, J. A. (2018) Homogeneización de series climáticas con Climatol. Versión 3.1.1. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/12185/1/homog_climatol-es.pdf.

Hernández-Espinosa, A. K., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., y Romo-Gómez, C. (2024). Estimación de los volúmenes históricos de las aguas residuales exportados por la megaciudad de México al Valle del Mezquital de 1985 a 2020. *Tecnología y ciencias del agua*, 15(5), 452-502. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-05-10

Hyndman, R. J. y Athanasopoulos, G. (2018) *Forecasting: principles and practice*, 2nd edition, OTexts: Melbourne, Australia. OTexts.com/fpp2.

Jahangir, M. H., Mahmoudi Aznaveh, A., y Yousefi, H. (2026). Comparation of different probability distribution functions in order to drought assessment using standardized runoff index (SRI): A case study. *Geology, Ecology, and Landscapes*, *10*(2), 619-632. https://doi.org/10.1080/24749508.2025.2563922

Juliani, B. H. T. y Okawa, C. M. P. (2017). Application of a Standardized Precipitation Index for Meteorological Drought Analysis of the Semi-Arid Climate Influence in Minas Gerais, Brazil. *Hydrology*, *4*(2), 26. https://doi.org/10.3390/hydrology4020026

Khan, M. A., Barykin, S., Karpov, D., Lukashevich, N., Ochilov, A., y Munir, R. (2025). Stochastic process-based drought monitoring and assessment system: A temporal switched weights approach for accurate and precise drought determination. *PLOS ONE*, *20*(2), e0307323.

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307323

Liang, C., Flamig, Z., Kossin, J. P., y Kearns, E. J. (2026). A Global Probabilistic Framework for Meteorological Drought Risk Assessment Using Self-Calibrating PDSI and Stochastic Simulation. *Climate*, *14*(6), 121. https://doi.org/10.3390/cli14060121

López-Teloxa, L. C., Ruiz-García, P., y Monterroso-Rivas, A. I. (2026). Ecosystems in Mexico Are Experiencing an Increase in Trend and Intensity in Aridity. *Environments*, *13*(4), 187. https://doi.org/10.3390/environments13040187

Magallanes-Quintanar, R., Galván-Tejada, C. E., Galván-Tejada, J. I., Méndez-Gallegos, S. J., García-Domínguez, A., y Gamboa-Rosales, H. (2022). Narx Neural Networks Models for Prediction of Standardized Precipitation Index in Central Mexico. *Atmosphere*, *13*(8), 1254. https://doi.org/10.3390/atmos13081254

Marín, C. A. E., Ramos L. J. A., Martínez C. D. A., Tuxpan V. J., De Lara B. J., y Morán R. J. (2019). Identification of the Hydrogeochemical Processes and Assessment of Groundwater Quality, Using Multivariate Statistical Approaches and Water Quality Index in a Wastewater Irrigated Region. *Water*, 11(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/w11081702

Méndez, M. P., Franco, A. V., y Domínguez, N. A. (2025). Uso del índice estandarizado de precipitación con R, para la evaluación de la intensidad de la sequía en la cuenca del río Papagayo, Guerrero. *Revista innova ingeniería, publicaciones técnicas de investigación*, *1*(10). https://innovaingenieria.uagro.mx/innova/index.php/innova/article/view/339

Montes-Vega, M. J., Guardiola-Albert, C., y Rodríguez-Rodríguez, M. (2023). Calculation of the SPI, SPEI, and GRDI Indices for Historical Climatic Data from Doñana National Park: Forecasting Climatic Series (2030–2059) Using Two Climatic Scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 by IPCC. *Water*, *15*(13), 2369. https://doi.org/10.3390/w15132369

Muñoz, M. J. L., Medranda, Z. J., Calderon, C. J., y Paz, L. J. (2025). Servicios ecosistémicos de cuencas hidrográficas en zonas urbanas y rurales: Beneficios ambientales y socioeconómicos clave para el desarrollo sostenible. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *6*(2). https://doi.org/10.56712/latam.v6i2.3797

Pita-Díaz, O., y Ortega-Gaucin, D. (2020). Analysis of Anomalies and Trends of Climate Change Indices in Zacatecas, Mexico. *Climate*, *8*(4), 55. https://doi.org/10.3390/cli8040055

Quiróz-Jiménez, J. D., Debajyoti-Roy, P., Castelán, H. C., e Islas, S. A. (2023). Impacto del Fenómeno de El Niño en la precipitación y agricultura del estado de Hidalgo, México. *Revista de Estudios Regionales*, *1*(1), 81-102. https://doi.org/10.59307/rerne1.13

Raha, S. y Gayen, S. K. (2020). Simulation of meteorological drought using exponential smoothing models: A study on Bankura District, West Bengal, India. *SN Applied Sciences*, 2(5), 909. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2730-3

Rosas-Baños, M. y García-Salazar, E. M. (2024). Wastewater and agriculture in Mezquital valley (Mexico): Analyzing alternatives from circular economy and ecological economy using bibliometric review. *Discover Water*, *4*(1), 61. https://doi.org/10.1007/s43832-024-00111-y

Santacruz-De León, G., Moran-Ramírez, J., y Ramos-Leal, J. A. (2022). Impact of Drought and Groundwater Quality on Agriculture in a Semi-Arid Zone of Mexico. Agriculture, 12(9), 1379. https://doi.org/10.3390/agriculture12091379

Song, Y. y Park, M. (2021). A Study on the Appropriateness of the Drought Index Estimation Method Using Damage Data from Gyeongsangnamdo, South Korea. *Atmosphere*, *12*(8), 998. https://doi.org/10.3390/atmos12080998

Soomro, A. G., Memon, A. H., Mahar, G. A., Samoon, H. A., y Sadoozai, N. L. (2026). Geospatial Rainfall–Runoff Modelling and Hydrological Assessment of an Ungauged Arid Mountain Catchment Using GIS and HEC-HMS. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, *17*(2), 75-81. https://doi.org/10.46660/int.j.econ.environ.geol..v17i2.830

Tapia, I. L. E. y Mendoza, M. E. Y. (2025). Impacto de la Sequía en la Disponibilidad de Agua y la Producción Agrícola en la Región VII Actopan: Estrategias de Adaptación y Repercusiones Socioeconómicas (2023-2024). *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, *14*(27), 18-26. https://doi.org/10.29057/icea.v14i27.14517

Téllez, P. L., Expósito, C. J., Fonseca, M. O. R., y Esteller, A. M. (2026). Calidad del agua y su distribución en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Geografía Aplicada*, *2*(1), 1-25. https://doi.org/10.36677/geografiaaplicada.v2i1.27552

Tihi, N. y Popov, S. (2023). Application of Holt-Winters Exponential Smoothing Method in Urban Drought Prediction. In *Proceedings of Engineering Conference*.

Tsesmelis, D. E., Leveidioti, I., Karavitis, C. A., Kalogeropoulos, K., Vasilakou, C. G., Tsatsaris, A., y Zervas, E. (2023). Spatiotemporal Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in the Eastern Mediterranean. *Climate*, *11*(5), 95. https://doi.org/10.3390/cli11050095

Velázquez-Zapata, J. A., y Dávila-Ortiz, R. (2025). Projected Meteorological Drought in Mexico Under CMIP6 Scenarios: Insights into Future Trends and Severity. *Geosciences*, *15*(5), 186. https://doi.org/10.3390/geosciences15050186

Zerga, B. (2025). Integrated watershed management: A review. *Discover Sustainability*, *6*(1), 657. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01352-0