



Interacciones macroclimáticas en la severidad de la sequía en la región de Lerma-Cutzamala

Macroclimatic interactions affecting drought severity in the Lerma-Cutzamala region

Brian Gustavo Pérez Juárez¹ , Alejandro Jaramillo Moreno² 

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.

² Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

Este estudio analiza la severidad de las sequías en las cuencas Lerma-Toluca y Cutzamala, evaluando su relación con los principales índices de variabilidad climática (macroclimáticos): ONI, PDO, AMO, NAO, QBO y PNA. Se utilizaron datos climatológicos (1960–2023), los índices de sequía SPI y SPEI, y análisis de correlación con desfases de hasta 12 meses. Los índices de sequía permitieron identificar eventos secos prolongados y extremos, mientras que los macroclimáticos permitieron evaluar su posible modulación por forzamientos de gran escala. Se concluye que ciertos patrones de variabilidad influyen en la ocurrencia, duración y magnitud de las sequías. Esta información mejora la comprensión climática y la gestión hídrica en zonas estratégicas.

Palabras clave: Sequía meteorológica, índices de sequía, Precipitación, condiciones macroclimáticas, Lerma-Cutzamala.

Abstract

This study analyzes the severity of droughts in the Lerma-Toluca and Cutzamala basins, evaluating their relationship with major climate variability indices (macroclimatic): ONI, PDO, AMO, NAO, QBO, and PNA. Climatological data (1960–2023), the drought indices SPI and SPEI, and correlation analyses with time lags of up to 12 months were used. The drought indices allowed for the identification of prolonged and extreme dry events, while the macroclimatic indices were used to assess their possible modulation by large-scale climate forcings. The results indicate that certain variability patterns significantly influence the occurrence, duration, and magnitude of droughts. This information enhances climate understanding and supports improved water resource management in strategic regions.

Keywords: Meteorological drought, Drought indices, Precipitation, Macroclimatic conditions, Lerma-Cutzamala.

Introducción

La sequía es un fenómeno natural caracterizado por un déficit de precipitación o disponibilidad de agua que puede prolongarse desde algunos días hasta varios años, con impactos negativos en el medio ambiente, sectores socioeconómicos y la salud pública (Mesbahzadeh *et al.*, 2020). Se han identificado cinco tipos principales: meteorológica, hidrológica, agrícola, socioeconómica y ecológica (Valiente, 2001; Dai, 2011; Crausbay *et al.*, 2017), evaluados mediante parámetros como magnitud, duración, frecuencia y extensión geográfica (Valiente, 2001; Dai, 2011). Entre los indicadores más comunes para su cuantificación están el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés).

Diversos estudios han documentado un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, incluida la sequía, debido al cambio climático (IPCC, 2023). Las

proyecciones indican que estos eventos tenderán a volverse más prolongados e intensos, con impactos significativos en las poblaciones vulnerables y en los ecosistemas, incrementando los riesgos de inseguridad alimentaria, escasez hídrica e incendios forestales (IPCC, 2023).

La variabilidad climática natural también modula la ocurrencia de sequías. En América del Norte, El Niño-

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 19 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

✉ Autor para correspondencia

Brian Gustavo Pérez Juárez

brian.perez@atmosfera.unam.mx

Como citar

Pérez Juárez BG, Jaramillo Moreno A (2026). Interacciones macroclimáticas en la severidad de la sequía en la región de Lerma-Cutzamala. *Ciencia Nicolaita* 97:118-129. DOI:[10.35830/cn.vi97.943](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.943)

Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) influye notablemente en los patrones de sequía en México (e.g., Pavia *et al.*, 2006; Bravo *et al.*, 2017). Otros modos relevantes incluyen la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), el Patrón de Norteamérica (PNA, por sus siglas en inglés), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Cuasi-Bienal (QBO, por sus siglas en inglés), que han demostrado tener impactos regionales y globales en la frecuencia y severidad de sequías (e.g., Newman *et al.*, 2003; Méndez & Magaña, 2010; Méndez-González *et al.*, 2010; Hu & Feng, 2012; Jaramillo *et al.*, 2021).

En México las sequías han ocasionado afectaciones históricas en distintos sectores socioeconómicos (e.g., CENAPRED, 2001, 2021, 2014; BANXICO, 2022; González-Villarreal & Arreguín-Cortés, 2023), destacando la de 2011 como la más severa en siete décadas (Sosa-Rodríguez & Constantino-Toto, 2023), así como los eventos de 2021 y 2023. El sistema Lerma-Cutzamala, vital para el suministro de agua a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), ha sido afectado por estas condiciones (IMTA, 2021).

Considerando la relevancia de la variabilidad climática en la ocurrencia de sequías y su impacto en sectores clave, este estudio tiene como objetivo diagnosticar la severidad de las sequías en las cuencas Cutzamala y Lerma-Toluca. Para ello, se realizó una caracterización climática del área de estudio, y se analizó la relación entre los índices macroclimáticos (ENSO, PDO, AMO, NAO, QBO y PNA) y los índices de sequía SPI y SPEI, con el fin de aportar una perspectiva climática integral de la región.

Materiales y métodos

Área de estudio y datos meteorológicos

El área de estudio abarca las cuencas RH12A (Río Lerma-Toluca) y RH18G (Río Cutzamala), en las regiones hidrológicas Lerma-Santiago y Balsas, con una superficie aproximada de 21,748 km². Esta zona contiene infraestructuras clave del sistema Lerma-Cutzamala, esencial para el abastecimiento de agua de la ZMVM (**Figura 1**). Para el análisis climático se usaron datos de 275 estaciones del SMN-CONAGUA, con series de precipitación acumulada y temperaturas máximas y mínimas diarias. Tras un proceso de homogeneización con CLIMATOL-R

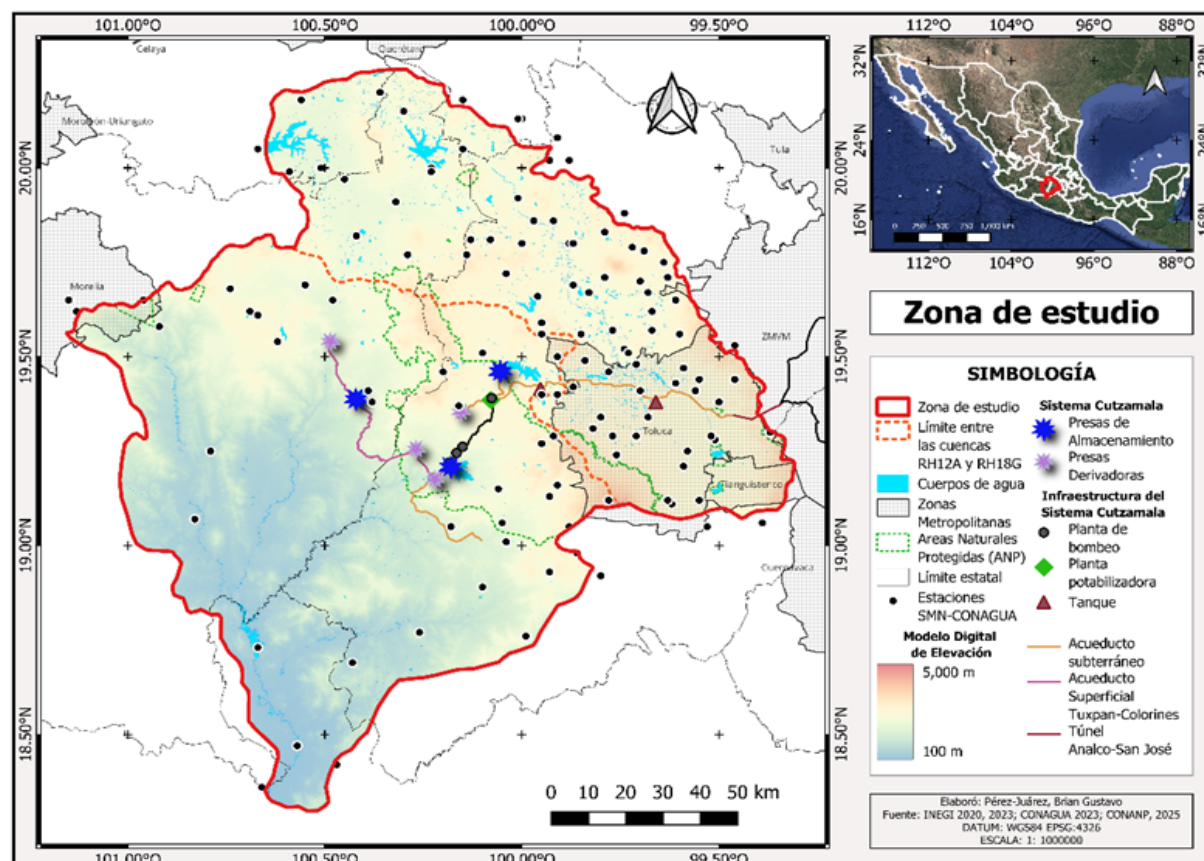


Figura 1. Zona de estudio.

(Guijarro, 2024), se seleccionaron 120 estaciones con registros completos de precipitación y 95 de temperatura. La evapotranspiración potencial (PET) se estimó mediante los métodos de Thornthwaite (1948) y Hargreaves (1994), ampliamente aplicados en estudios de sequía en México (e.g., Castillo-Castillo *et al.*, 2017; Llanes-Cárdenas *et al.*, 2017; Hernández-Vásquez *et al.*, 2022; Carrillo-Carrillo *et al.*, 2025), con el fin de comparar enfoques con diferentes requerimientos de datos climáticos.

Índices de sequía

Se calcularon los índices de sequía SPI y SPEI, ambos utilizando la librería SPEI desarrollada por Vonk, (2024). El SPI mide el déficit de precipitación respecto a su media histórica, facilitando la evaluación de la disponibilidad hídrica (McKee *et al.*, 1993, 1995). En la Ecuación (1) se muestra su expresión de cálculo:

$$SPI = \frac{P_i - \mu_j}{\sigma} \quad (1)$$

donde P_i es la precipitación, μ_j es la media para una escala de tiempo específico y σ es la desviación estándar. Además, se ajustaron distribuciones log-normal, gamma y Weibull para las escalas de 3, 6 y 12 meses, respectivamente, siguiendo recomendaciones de la literatura (e.g., Coronel-Brizio & Llanos-Arias, 1996; González-Camacho *et al.*, 2011).

El SPEI, propuesto por Vicente-Serrano *et al.* (2010), incorpora el efecto de la temperatura mediante el balance hídrico (Ecuación 2):

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

donde PET_i es la evapotranspiración potencial para la escala temporal deseada. Para el SPEI también se ajustó una distribución Pearson III a las series D_i , considerando las mismas escalas temporales (Vicente-Serrano *et al.*,

2010). Su principal ventaja es que incluye la influencia térmica en el análisis de sequías, siendo útil en un contexto de cambio climático.

Clasificación e identificación de periodos de sequía

La clasificación de los periodos secos se basa en los valores del SPI y SPEI, de acuerdo con categorías definidas en la literatura. En la **Tabla 1** se definen los rangos de valores típicos del SPI/SPEI y su correspondiente interpretación cualitativa, que permite identificar desde condiciones extremadamente húmedas hasta sequías excepcionales.

Se consideró un periodo de sequía aquel en el que el índice de sequía (SI) se mantuvo de forma continua en valores negativos y alcanzó al menos un valor igual o inferior a -1.0 . Concluyendo cuando el índice recupera valores positivos (Vega-Camarena *et al.*, 2018). La magnitud de la sequía (M) se estimó según la metodología del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, *s.f.*), como se muestra en la Ecuación (3): la suma de los valores del índice durante la duración del período seco (n meses), dividida entre el umbral de sequía severa ($SI_u = -1.3$; ver **Tabla 1**).

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n SI_i}{SI_u} \quad (3)$$

Índices macroclimáticos

Se emplearon seis índices de variabilidad climática ampliamente reconocidos por representar fenómenos atmosféricos de gran escala que modulan la distribución regional de precipitación y temperatura, y cuya influencia puede estar asociada a la ocurrencia y severidad de las sequías. El Índice del Niño-Oceánico (ONI) caracteriza las fases cálidas (El Niño) y fría (La Niña) del fenómeno ENSO. La AMO está relacionada con variaciones térmicas a largo plazo en el Atlántico Norte, mientras que la PDO se vincula con patrones de temperatura superficial del mar en el

Tabla 1. Clasificación de los valores negativos del índice de sequía (SI) y las Categorías de la intensidad de la sequía del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM). Adaptada de Llanes-Cárdenas *et al.* (2017) y Hernández-Vásquez *et al.* (2022).

Anomalía	SI	Régimen	Código	Categoría NADM
Negativa	<-2.0	(SI < -2.0)	D4 (≤ -2.0)	Sequía excepcional
	-1.5	(-2.0 < SI < -1.5)	D3 (-2.0 < SI $\leq$ -1.6)	Sequía Extrema
	-1.0	(-1.5 < SI < -1.0)	D2 (-1.6 < SI $\leq$ -1.3)	Sequía severa
			D1 (-1.3 < SI $\leq$ -0.8)	Sequía moderada
	-0.5	(-1.0 < SI < 1.0)	D0 (-0.8 < SI $\leq$ -0.5)	Anómalamente seco
Neutro	0		N (-0.5 < SI < 0.5)	Sin sequía

SI = SPI o SPEI

Pacífico Norte. La NAO describe fluctuaciones en la presión atmosférica entre Islandia y las Azores. Por su parte, la QBO refleja la variabilidad de los vientos estratosféricos en la zona tropical, y el PNA representa oscilaciones de baja frecuencia en la corriente en chorro del hemisferio norte. Fuente de datos: <https://psl.noaa.gov> y <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>.

Reanálisis ERA5

El reanálisis atmosférico global ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio ofrece datos horarios y mensuales desde 1940, con resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Dee *et al.*, 2011). Se emplearon variables mensuales en niveles de 850, 700, 500 y 200 hPa (humedad específica, altura geopotencial y divergencia), así como en superficie (presión atmosférica, contenido total de agua, agua precipitable, humedad específica y flujo neto de radiación de onda larga en el tope de la atmósfera). Con esta información se elaboraron mapas de anomalías mensuales para los periodos secos y, a partir de ellos, un mapa compuesto representativo de las condiciones sinópticas medias.

Coefficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida adimensional de la asociación lineal entre variables aleatorias con distribución normal (Schober *et al.*, 2018). Toma valores entre -1 y $+1$, donde los extremos indican correlación perfecta (positiva o negativa) y 0 ausencia de correlación. En este trabajo se calculó r entre índices de sequía e índices macroclimáticos, aplicando un desfase

temporal de 0 a 12 meses para explorar relaciones no simultáneas y evaluar la posible influencia diferida de la variabilidad climática en las condiciones regionales de sequía.

Resultados y discusión

Precipitación y temperatura regional

Las series de precipitación acumulada diaria (**Figura 2a**), mensual (**Figura 2b**) y anual (**Figura 2c**), calculadas a partir del conjunto de estaciones del SMN-CONAGUA, evidencian una alta variabilidad interanual. Los años más secos fueron 1960, 1979, 1982, 2005, 2020 y 2023 (700–800 mm), mientras que 1967, 1992 y 2018 superaron los 1100 mm/año. Esta variabilidad es coherente con los contrastes climáticos y topográficos de la región.

Las series promedio de temperatura máxima (**Figura 2d–f**) y mínima (**Figura 2g–i**), en escalas diaria, mensual y anual, muestran una tendencia creciente, más acentuada en la temperatura máxima. En particular, esta presenta una reducción en su rango mensual: de $\sim 10^\circ\text{C}$ (~ 18 – 28°C) en las décadas iniciales a $\sim 6^\circ\text{C}$ (~ 22 – 28°C) en los años recientes. Ambas variables registran años extremos, pero el calentamiento es más notorio en las series de temperatura máxima.

Índices de sequía

Con el SPI-3 se identificaron eventos intensos (< -2.4) durante 1982, 1998–1999, 2011 y 2023, con duraciones de 1 a 8 meses, y eventos prolongados (≥ 11 meses) en 1989,

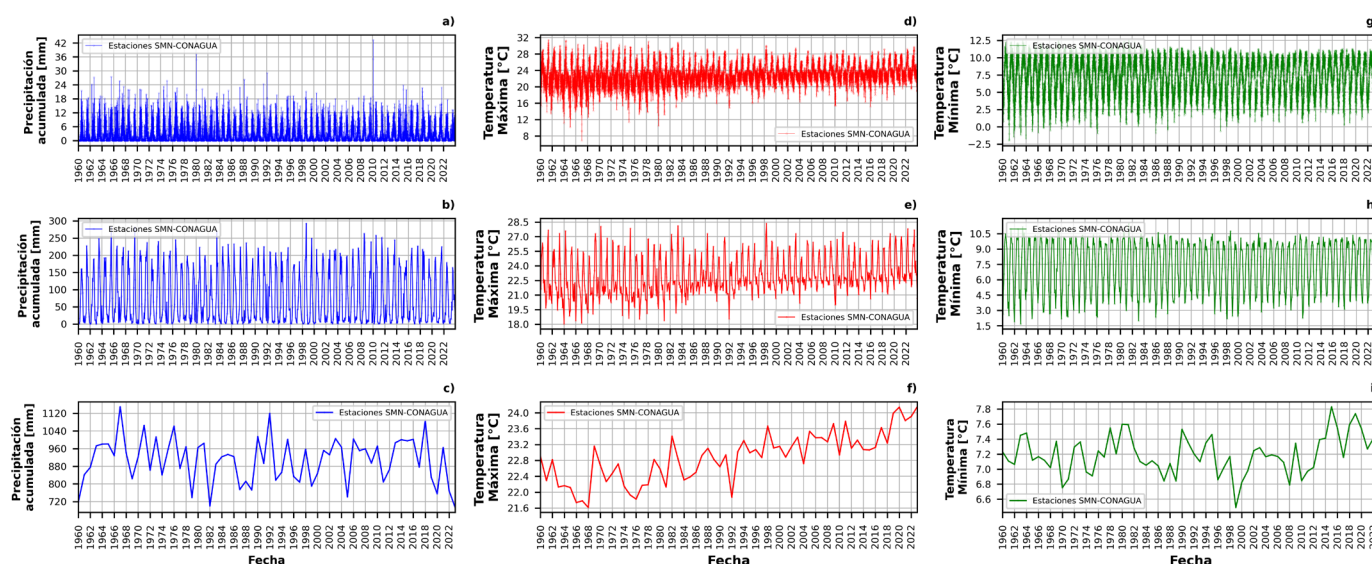


Figura 2. Ciclo regional promedio de: **a)** precipitación acumulada diaria, **b)** mensual y **c)** anual; temperatura máxima **d)** diaria, **e)** mensual y **f)** anual; y temperatura mínima **g)** diaria, **h)** mensual y **i)** anual.

2012–2013, 2020–2021 y 2022–2023. El SPI-6 registró mayor frecuencia de sequías, con valores extremos entre -2.4 y -3 y al menos ocho episodios ≥ 10 meses. En el SPI-12 predominaron eventos prolongados (≥ 10 meses), incluyendo cuatro ≥ 20 meses (1960–1963, 1982–1984, 1987–1990 y 2011–2013), con mínimos cercanos o inferiores a -2.5 .

En la **Figura 3**. Se muestra el índice SPEI (con resultados muy similares al SPI) se utilizó únicamente la versión calculada con el método de Hargreaves (1994) (en adelante, método H), por su mayor consistencia regional. Los patrones fueron similares al SPI: eventos breves (1–8 meses) y valores mínimos < -2.4 en el SPEI-3; al menos siete episodios ≥ 10 meses en el SPEI-6; y diez ≥ 10 meses en el SPEI-12, de los cuales cuatro superaron los 20 meses. En conjunto, ambos índices capturan sequías ampliamente documentadas en México, como las de 1998–2000, 2011 y 2022–2023, cuya señal también se observa en la región de estudio, evidenciando su carácter espacialmente extendido.

En la **Tabla 2** se resume el total de periodos secos identificados por cada serie del índice. Por ejemplo, se en-

Tabla 2. Periodos secos identificados con los índices SI

Índice	Escala (tiempo)	Ajuste (PDF)	Método PET	No. de periodos secos (1960-2023)
SPI	3 meses	LogNormal	-	46
	6 meses	Gamma	-	33
	12 meses	Weibull	-	15
SPEI	3 meses	Pearson III	H	45
	3 meses	Pearson III	T	49
	6 meses	Pearson III	H	31
	6 meses	Pearson III	T	30
	12 meses	Pearson III	H	15
	12 meses	Pearson III	T	13

contró que el 24% y 22.5% de los periodos secos identificados con el SPI-6 y SPEI-6 (método H), respectivamente, tuvieron una duración igual o superior a 10 meses. En el caso del SPI-12, aproximadamente el 67% de los periodos

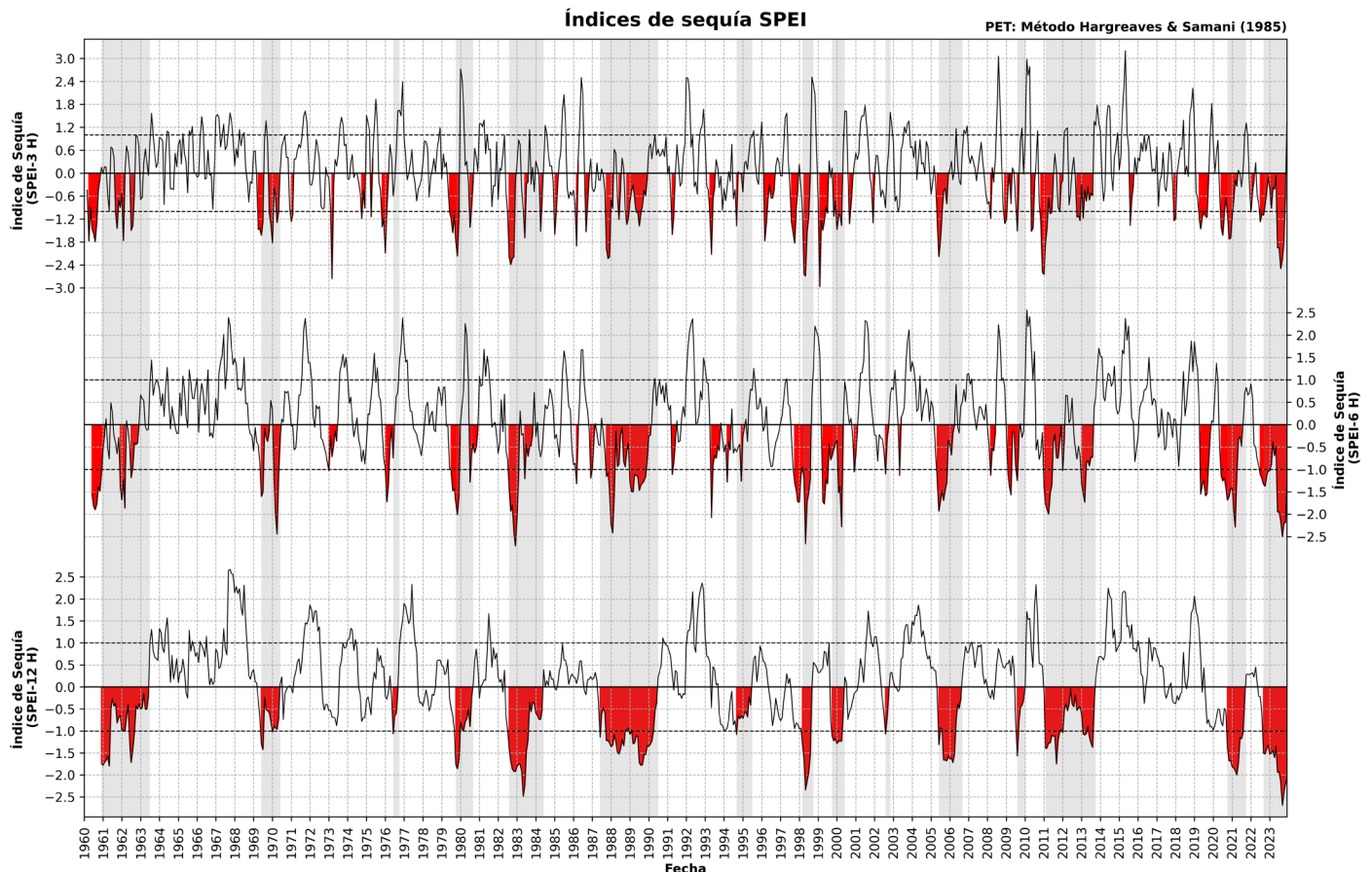


Figura 3. Índice SPEI-3, 6, 12 meses.

secos presentaron una duración mayor a 10 meses, mientras que para el SPEI-12 (método H), cerca del 27% de los eventos se extendieron por 20 meses o más.

Para identificar patrones temporales en la ocurrencia y características de las sequías, se agruparon los periodos secos detectados con el SPEI (método H) por décadas: 1960–1969, 1970–1979, 1980–1989, 1990–1999, 2000–2009 y 2010–2019, lo que permite observar concentraciones de eventos y evaluar cambios en frecuencia, duración y severidad a lo largo del tiempo.

La **Figura 4** presenta la evolución por década de la magnitud promedio, duración promedio y número de eventos secos para las escalas de 3, 6 y 12 meses. Los máximos y mínimos de magnitud y duración coinciden en las mismas décadas para SPEI-6 y SPEI-12, indicando mayor coherencia temporal en eventos prolongados y severos, mientras que el SPEI-3 muestra un patrón más irregular. Aproximadamente el 40% de los eventos de SPEI-3 y SPEI-6 ocurrieron en las décadas de 1980–1999 y 1990–2009, respectivamente, y cerca del 42% de los eventos de SPEI-12 se concentraron entre 1990 y 2009.

Estos hallazgos coinciden con estudios previos en México (Castillo-Castillo *et al.*, 2017; Vega-Camarena *et al.*, 2018; Hernández-Vásquez *et al.*, 2022; Carrillo-Carrillo *et al.*, 2025) y confirman que la severidad y la duración de las sequías no siempre están correlacionadas: los eventos más prolongados no necesariamente son los más intensos, y viceversa. No obstante, existen diferencias en los periodos secos identificados, ya que la mayoría de los estudios se ha centrado en zonas del norte de México.

Índices macroclimáticos

En la **Figura 5** se presentan las series de los índices macroclimáticos empleados en este estudio (AMO, PDO, ONI, QBO, NAO y PNA), junto con la localización de los periodos secos identificados mediante el SPEI-12. Para cada periodo seco se muestran su valor mínimo (en negro), duración (gris) y magnitud (rojo), lo que permite explorar visualmente posibles relaciones con las fases de los fenómenos climáticos de gran escala.

La **Tabla 3**. Fases de los índices macroclimáticos durante los periodos secos identificados con el índice

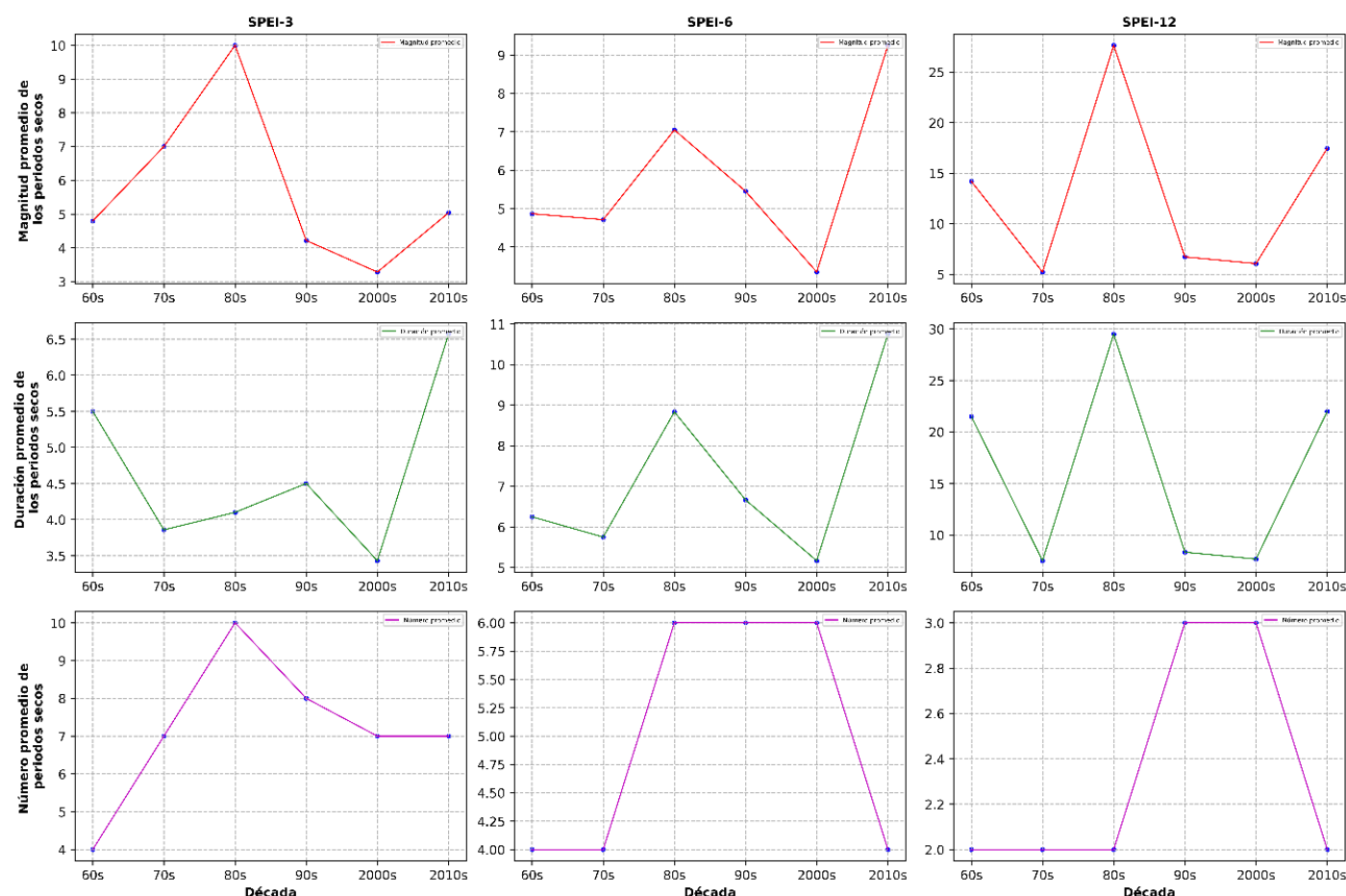


Figura 4. Magnitud promedio, duración promedio y número de periodos secos identificados con el índice SPEI (método H), para las escalas de a) 3 meses, b) 6 meses y c) 12 meses.

SPEI-12 (método H), clasificados como eventos de larga duración (negritas), extremos (*) y de gran magnitud (#). resume de manera cualitativa las fases de cada índice macroclimático durante los periodos secos identificados con el SPEI-12. Considerando tres categorías: periodos de larga duración (≥ 12 meses), periodos extremos (SPEI-12 < -2) y periodos de gran magnitud (magnitud ≥ 20).

Se identificaron ocho periodos de larga duración. Los primeros cuatro se registraron durante fases positivas (+) o de transición (+-, -+) del ENSO, mientras que los cuatro más recientes ocurrieron bajo fases negativas (-) o de transición (-+). En el caso de la PDO, cinco de estos eventos coincidieron con fases (-), y tres con fases (+). Específicamente, el primero ocurrió en fase (-), los siguientes tres en fases (+), y los restantes nuevamente en fase (-). Para la AMO, tres periodos se asociaron con fases (-) y cinco con fases (+). Respecto a la NAO, tres

ocurrieron durante fases de transición (+-), tres durante fase (-) y dos en fase (+). La QBO presentó principalmente fases de transición (+- o -+). Por último, la PNA mostró una distribución equilibrada: dos eventos en cada una de las fases (+-), (-+), (-) y (+).

Para los periodos extremos, los dos primeros coincidieron con fases de transición (+-) del ENSO y con fases (+) o de transición (+-) de la PDO. En contraste, los eventos posteriores mostraron más variabilidad: por ejemplo, el periodo No. 5 se asoció con una fase (-) de la AMO, mientras que la NAO, QBO y PNA se encontraban en fases (+) o de transición (+-). En contraste, durante el periodo No. 8, la AMO ya mostraba fase (+), y las fases de la NAO y QBO se ubicaban en negativas (-), con un PNA en fase (+). Para los últimos periodos extremos, se observa coincidencia de fases negativas (-) o de transición (-+) en el ENSO y la PDO, fases (+) en la AMO, fases (-) o de

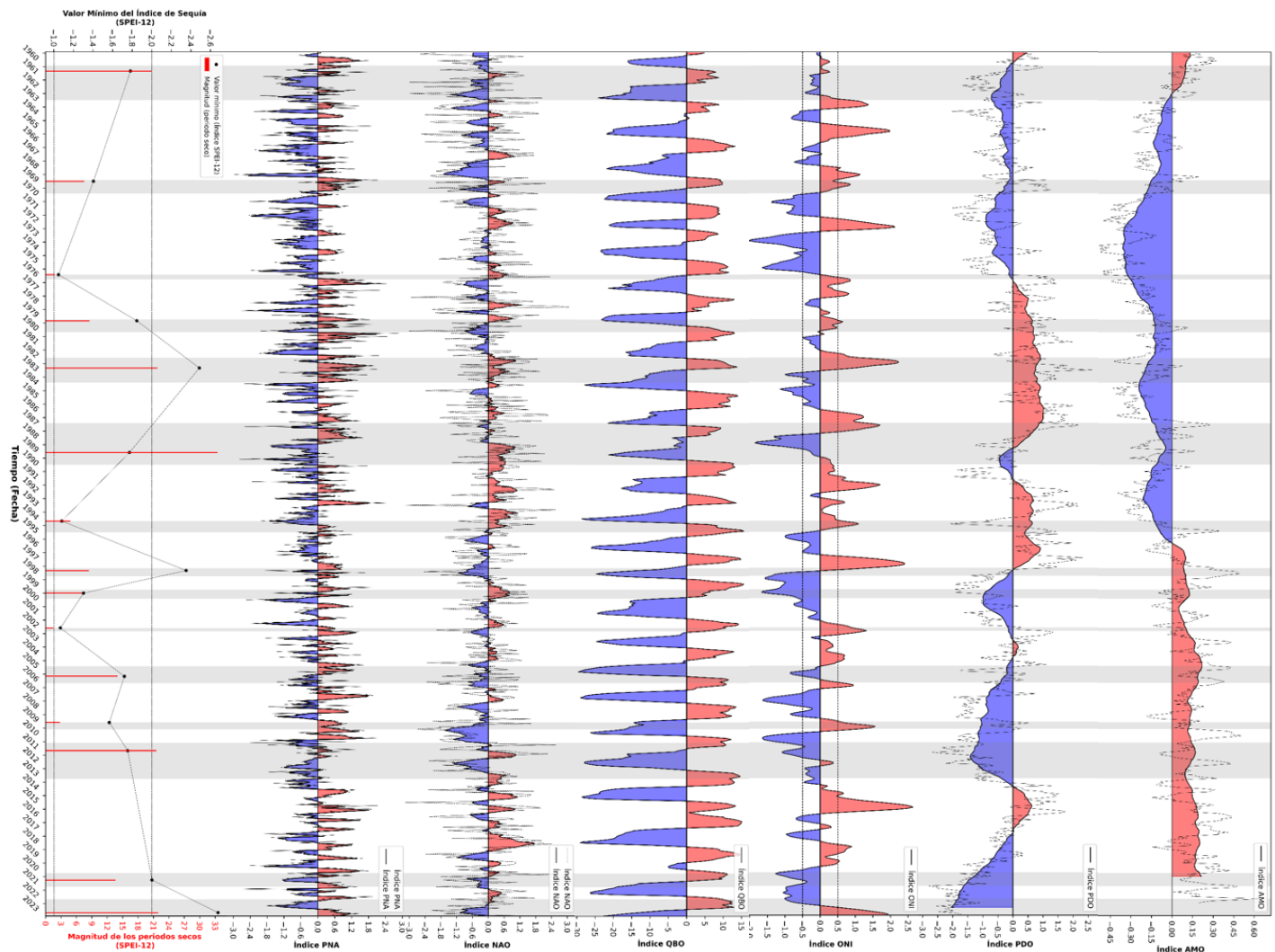


Figura 5. Índices macroclimáticos: AMO, PDO, ONI, QBO, NAO, PNA. En el panel izquierdo se identifican los periodos secos encontrados con el SPEI-12 (método H), sus valores mínimos (negro), duración (gris) y magnitud (rojo)

Tabla 3. Fases de los índices macroclimáticos durante los periodos secos identificados con el índice SPEI-12 (método H), clasificados como eventos de larga duración (negritas), extremos (*) y de gran magnitud (#).

Nº.	Inicio	Fin	ONI	PDO	AMO	NAO	QBO	PNA
1 [#]	01/12/1960	01/07/1963	+	-	+	-	+	-
2	01/06/1969	01/06/1970	+	+	-	+	+	+
3	01/06/1976	01/10/1976	+	+	-	+	-	-
4	01/10/1979	01/09/1980	+	+	-	-	+	+
5 [#]	01/08/1982	01/06/1984	+	+	-	+	+	+
6 [#]	01/06/1987	01/07/1990	+	+	-	+	+	+
7	01/09/1994	01/07/1995	+	+	-	+	+	+
8*	01/03/1998	01/10/1998	+	+	+	-	-	+
9	01/10/1999	01/06/2000	-	-	+	+	+	+
10	01/08/2002	01/11/2002	+	+	+	-	+	+
11	01/06/2005	01/09/2006	-	-	+	-	+	+
12	01/08/2009	01/02/2010	+	+	+	-	-	+
13 [#]	01/02/2011	01/10/2013	-	-	+	+	+	-
14*	01/10/2020	01/10/2021	-	-	+	+	+	+
15 [#]	01/09/2022	01/12/2023	+	-	+	-	+	+

transición (+-) en la NAO, y (+-) para la QBO, con fases (-+) en el PNA.

En los periodos de gran magnitud, los dos primeros ocurrieron en fases de transición (+- o -+) del ENSO, mientras que los dos últimos ocurrieron en fases (-) y de transición (-+). La PDO mostró más periodos en fases (-), y menos en fase (+). En contraste, la AMO presentó mayor presencia de fases (+), con solo dos eventos en fase (-). En cuanto a la NAO, predominaron las fases (+) y de transición (+-), con dos periodos en fase (-). La QBO mostró un comportamiento similar, con la mayoría de los eventos en fase de transición (+-) y uno en fase (-+). Finalmente, para la PNA, la mayoría de los eventos se presentaron en fases negativas o de transición (-+ o -+), y uno en fase (+).

Las relaciones cualitativas entre los periodos secos y las fases climáticas coinciden con lo reportado por Vega-Camarena *et al.* (2018), especialmente respecto a la PDO y AMO, a pesar de que la zona de estudio difiere de la utilizada en ese trabajo.

Correlaciones Índices de sequía vs Índices macroclimáticos

La **Figura 6**. Coeficientes de correlación de Pearson entre el SPEI-12 (método H) y los índices macroclimáticos, calculados con desfases de 0 a 12 meses. presenta las correlaciones de Pearson entre el índice de sequía SPEI y los índices macroclimáticos, considerando desfases de 0 a 12

meses, con el objetivo de identificar posibles modulaciones diferidas de estos fenómenos sobre la sequía.

Para el SPEI-3, las mayores correlaciones de Pearson con el índice ONI fueron positivas y se obtuvieron al aplicar un desfase de 0 a 1 mes. En contraste, las correlaciones más altas con la AMO fueron negativas, alcanzándose al desplazar el SPEI-3 entre 4 y 6 meses. Con la PDO, se observaron las correlaciones positivas más fuertes con un desfase de 4 a 5 meses, mientras que las correlaciones negativas más significativas se registraron al desplazar 12 meses. Para la NAO las correlaciones más altas fueron positivas, y se presentaron con desplazamientos de 4, 5 y 10 meses. En el caso de la QBO, las correlaciones más destacadas fueron negativas, obtenidas al aplicar un desfase de 1 a 3 meses. Finalmente, con el índice PNA, se registraron las correlaciones más fuertes (negativas) al desplazar el SPEI-3 entre 11 y 12 meses.

En el caso del SPEI-6, las correlaciones positivas más elevadas con el índice ONI se alcanzaron con un desfase de 10 a 11 meses. Con el índice AMO, los valores más altos de correlación negativa se observaron al desplazar entre 6 y 7 meses. Para el índice PDO, las correlaciones positivas más significativas se obtuvieron con un desplazamiento de 0 a 1 mes. En el caso de la NAO, el valor máximo de correlación se presentó con un desfase de 6 meses. Con la QBO, las correlaciones negativas más destacadas se registraron al aplicar un desfase de 3 a 4 meses. Respecto al índice PNA, se obtuvieron las correlaciones negativas más altas al desplazar el SPEI-6 entre 11 y 12 meses.

Finalmente, con el SPEI-12, las mayores correlaciones con el índice ONI fueron positivas y se obtuvieron al aplicar un desplazamiento de 9 a 10 meses. Con el índice AMO, se registraron los coeficientes negativos más altos al desplazar entre 11 y 12 meses. En el caso del PDO, la correlación más significativa fue positiva y se alcanzó con un desfase de 5 meses. Con la NAO, el mayor valor de correlación fue negativo y ocurrió sin desplazamiento (0 meses). Las correlaciones negativas más fuertes con la QBO se observaron al aplicar un desfase de 7 a 9 meses. Por último, con el índice PNA, se obtuvieron los coeficientes negativos más altos al desplazar el SPEI-12 en los meses 3, 11 y 12.

Los resultados sugieren que la PDO, AMO y ENSO desempeñan un papel importante en la modulación de la sequía en la región, en concordancia con estudios generales en Norteamérica y en algunas regiones de México (Pavia *et al.*, 2006; Bravo *et al.*, 2017; Vega-Camarena *et al.*, 2018). Otros trabajos han analizado de manera indirecta la influencia del macroclima sobre la sequía mediante sus efectos en los patrones de precipitación en México y Nor-

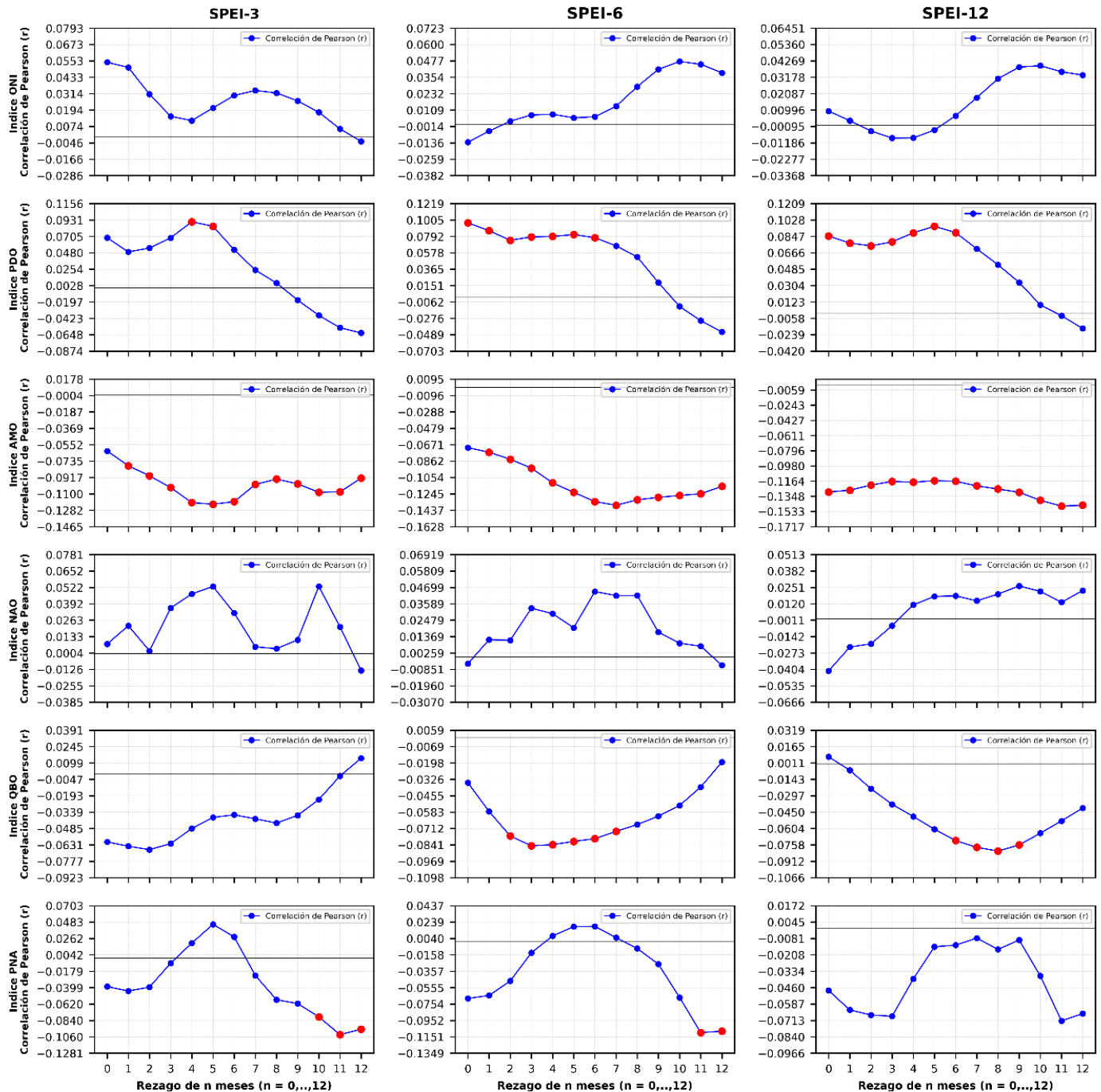


Figura 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre el SPEI-12 (método H) y los índices macroclimáticos, calculados con desfases de 0 a 12 meses.

teamérica, considerando combinaciones como ENSO+QBO, AMO+PDO, AMO-ENSO ó ENSO+QBO (e.g., Méndez & Magaña, 2010; Méndez-González *et al.*, 2010; Hu & Feng, 2012; Jaramillo *et al.*, 2021). No obstante, no hay un consenso de general de las variables macroclimáticas que controlan el fenómeno de la sequía en el centro de México.

Patrones atmosféricos durante periodos secos

Con el objetivo de identificar los patrones sinópticos promedio asociados a los periodos secos, se analizaron las anomalías mensuales de variables clave del reanálisis ERA5 correspondientes a los eventos identificados con el índice SPEI-12 (método H). La **Figura 7** muestra los promedios compuestos de: a) altura geopotencial a 500 hPa, b) divergencia a 500 hPa, c) flujo de radiación neta

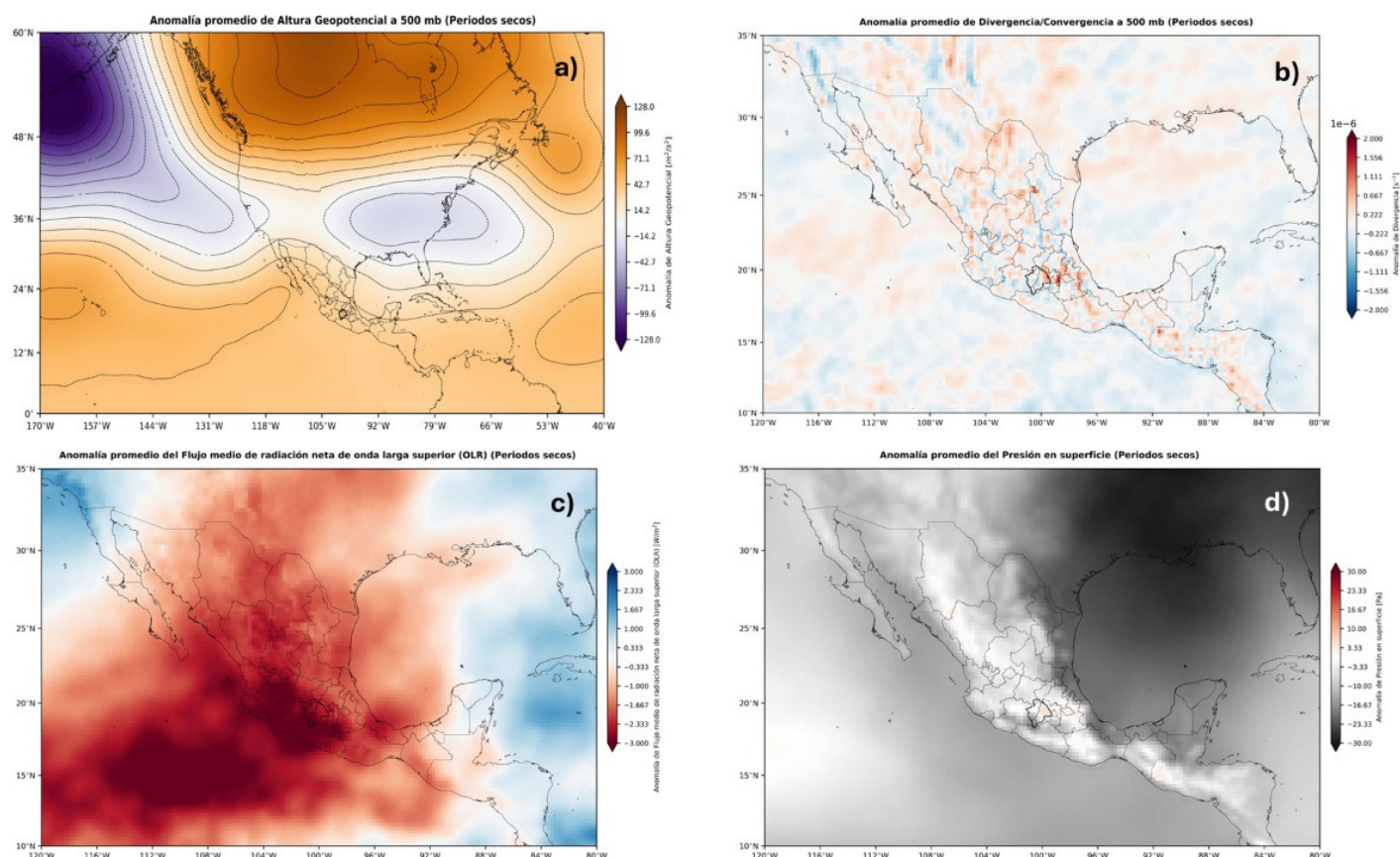


Figura 7. Promedio de las anomalías mensuales de: **a)** altura geopotencial (500 hPa), **b)** divergencia (500 hPa), **c)** flujo de radiación neta de onda larga superior, y **d)** presión en superficie, correspondientes a los periodos secos identificados con el índice SPEI-12 (método H).

de onda larga en el tope de la atmósfera ($-1 \times OLR$), y d) presión en superficie.

Las anomalías de altura geopotencial (**Figura 7a**) revelan un núcleo negativo al sureste de Estados Unidos, asociado a un sistema de baja presión en niveles medios y altos, mientras que sobre gran parte de México predominan anomalías positivas, lo cual sugiere condiciones más estables y menos favorables para la convección. El campo de divergencia (**Figura 7b**) muestra un patrón mixto en la región de estudio, con zonas de anomalías positivas y negativas, reflejando un ambiente atmosférico sin una señal clara de ascenso o subsidencia dominante.

Por su parte, las anomalías del flujo de radiación neta de onda larga en el tope de la atmósfera ($-1 \times OLR$; **Figura 7c**) son predominantemente negativas en México, lo que indica una disminución de nubosidad alta o condiciones más despejadas que permiten una mayor entrada de radiación hacia la superficie. En cuanto a la presión en superficie (**Figura 7d**), se observan anomalías ligeramente positivas en la mayor parte de la región de estudio. En conjunto, estos patrones describen un entorno sinóptico caracterizado por estabilidad atmosférica y menor cobertura nubosa, condiciones típicamente asociadas a una reduc-

ción en la actividad convectiva y, por tanto, a un régimen deficitario de lluvias. Como trabajo futuro, se propone explorar en mayor profundidad las conexiones entre estos patrones y los distintos fenómenos macroclimáticos que podrían favorecer su aparición

Conclusiones

Este estudio permitió diagnosticar la severidad de las sequías en las cuencas de los ríos Cutzamala y Lerma-Toluca mediante los índices SPI y SPEI y su relación con diversos índices macroclimáticos. Los resultados muestran que las sequías en la región son recurrentes, con eventos de mayor duración y magnitud, especialmente en escalas de 6 y 12 meses, y que los episodios de mayor duración y magnitud coinciden con fases específicas de ONI, PDO y AMO, sugiriendo una modulación del macroclima sobre los patrones regionales. El análisis de correlación reveló desfases temporales entre los índices climáticos y el SPEI, destacando la necesidad de considerar múltiples forzantes para comprender la dinámica de la sequía. Los patrones atmosféricos del reanálisis ERA5 contextualizan

las condiciones sinópticas promedio durante los periodos secos, caracterizadas por estabilidad atmosférica y subsidencia en niveles medios y altos, aunque cada evento requiere análisis individualizado.

En conjunto, estos hallazgos proporcionan una base climática sólida que puede mejorar el monitoreo y la predicción de la sequía en la región para implementar medidas de mejora en la gestión hídrica en una región estratégica como el Lerma-Cutzamala, contribuyendo a planificar recursos y mitigar impactos socioeconómicos asociados a la escasez de agua en poblaciones asentadas dentro y fuera de la zona de estudio.

Adicionalmente, en este trabajo se identificaron **limitaciones** importantes asociadas al uso exclusivo de coeficientes de correlación lineales, los cuales restringen el análisis a relaciones estrictamente lineales. Estas limitaciones resaltan la necesidad de explorar enfoques que permitan captar interacciones más complejas entre variables climáticas e índices de sequía. La regresión multivariable, aunque aún lineal, constituye un punto de partida útil para integrar múltiples forzantes de manera conjunta, y su aplicación puede abrir el camino hacia métodos no lineales más sofisticados que representen con mayor fidelidad la complejidad de los procesos climáticos.

Agradecimientos

Al programa de becas nacionales de estudios de posgrado de la Secretaría de Investigación Científica, Humanística, Tecnológica e Innovación (SECIHTI) de México por la beca otorgada para estudios de Maestría en el Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM.

Referencias

BANXICO (2022). Recuadro 2: Sequía en México y su Potencial Impacto en la Actividad Económica: Informe trimestral No. Abril-junio 2022, Banco de México. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/recuadros/%7B3A0127A1-D0C9-7D61-C9AE-E57E127FB39B%7D.pdf> [consultado el 10 de enero de 2025].

Bravo Cabrera JL, Azpra-Romero E, Zarraluqui V, Gay-García C (2017). Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atmósfera* 30(3):221–232. doi:10.20937/ATM.2017.30.03.03.

Carrillo-Carrillo M, Ibáñez-Castillo L, Arteaga-Ramírez R, Arévalo-Galarza G (2025). Spatio-Temporal Analysis of Drought with SPEI in the State of Mexico and Mexico City. *Atmosphere* 16(2):202. doi:10.3390/atmos16020202.

Castillo-Castillo M, Ibáñez-Castillo LA, Valdés JB, Arteaga-Ramírez

R, Vázquez-Peña MA (2017). Analysis of meteorological drought in the Fuerte River Basin, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua* 8(1):35–52. doi:10.24850/j-tyca-2017-01-03.

CENAPRED (2002). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2001. http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/375/1/images/no_3.pdf [consultado el 12 de octubre de 2024].

CENAPRED (2022). Peligros Naturales y Tecnológicos relevantes durante el período 1810-2010 (2010a ed.) - 2021. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/archivo/documentos/Peligros_Naturales_Tecnologicos_1810_2010.pdf [consultado el 12 de octubre de 2024]

CENAPRED (2022). Sequía (2022/11 ed.) - 2014. http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/372/1/images/fasciculo_sequias.pdf [consultado el 13 de octubre de 2024].

Coronel-Brizio HF, Llanos-Arias J (1996). Sobre el ajuste de la distribución Gamma a datos de precipitación pluvial. *Ingeniería hidráulica en México* 11:15–20.

Crausbay SD, Ramirez AR, Carter SL, Cross MS, Hall KR, Bathke DJ, Betancourt JL, Colt S, Cravens AE, Dalton MS, Dunham JB, Hay LE, Hayes MJ, McEvoy J, McNutt CA, Moritz MA, Nislow KH, Raheem N, Sanford T (2017). Defining Ecological Drought for the Twenty-First Century. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(12):2543–2550. doi:10.1175/BAMS-D-16-0292.1.

Dai A (2011). Drought Under Global Warming: A Review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2:45–65. doi:10.1002/wcc.81.

Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, ... Vitart F (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(656):553–597. doi:10.1002/qj.828 (web).

González-Villarreal FJ, Arreguín-Cortés FI (2023). “Gestión Integral de Sequías: Introducción, Red del Agua - UNAM, <https://agua.org.mx/biblioteca/impluvium-gestion-integral-de-sequias-no-22-red-del-agua-unam/> [consultado el 20 de septiembre de 2024].

González-Camacho JM, Pérez-Rodríguez P, Ruelle P (2011). Estimación de índices normalizados de lluvia mediante la distribución gamma generalizada extendida. *Tecnología y ciencias del agua* 2(4):65–76.

Guijarro JA (2024). “Guía de uso del paquete de R climatol (versión 4.1.1)”. <https://www.climatol.eu/climatol4.1.1-es.pdf> [consultado el 13 de mayo de 2024]

Hargreaves GH (1994). Defining and Using Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6):1132–1139. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:6(1132) (web).

Hernández-Vásquez CC, Ibáñez-Castillo LA, Arteaga-Ramírez R, Monterroso-Rivas AI, Cervantes-Osornio R (2022). Pronóstico de

- sequías meteorológicas usando redes neuronales artificiales en la cuenca del río Sonora, México. *Tecnología y ciencias del agua* 13(3):242–292. doi:10.24850/j-tyca-2022-03-06.
- Hu Q, Feng S (2012). AMO- and ENSO-Driven Summertime Circulation and Precipitation Variations in North America. *Journal of Climate* 25(19):6477–6495. doi:10.1175/JCLI-D-11-00520.1.
- IMTA (s.f.). Vulnerabilidad del Cutzamala - 2021. <http://www.gob.mx/imta/articulos/vulnerabilidad-del-cutzamala?idiom=es> [consultado el 12 de febrero de 2025].
- IMTA (s.f.). Monitor de Sequía | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua | Monitoreo Mesoamericano de Sequía: Tzolkín. <http://galileo.imta.mx/Sequias/moseq/marcoteoricoGob.html> [consultado el 12 de febrero de 2025].
- IPCC (2023). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), *Climate Change 2023*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Jaramillo A, Dominguez C, Raga G, Quintanar AI (2021). The Combined QBO and ENSO Influence on Tropical Cyclone Activity over the North Atlantic Ocean. *Atmosphere* 12(12):2073–4433. doi:10.3390/atmos12121588.
- Llanes-Cárdenas O, Peinado-Guevara HJ, Montoya J, Norzagaray-Campos M, González-Ocampo HA, Campista-León S (2017). Seasonal Trend Indicators and Return Periods of Meteorological Drought in the Northern States of Mexico. *Polish Journal of Environmental Studies* 26(4):1471–1484. doi:10.15244/pjoes/68447.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* 179–184.
- Méndez-González J, Ramírez-Leyva A, Cornejo-Oviedo E, Zárate-Lupercio A, Cavazos-Pérez T (2010). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas* 73:57–70. doi:10.14350/rig.23862.
- Méndez M, Magaña V (2010). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 23(5):1175–1188. doi:10.1175/2009JCLI3080.1.
- Mesbahzadeh T, Mirakbari M, Mohseni Saravi M, Soleimani Sardoo F, Miglietta MM (2020). Meteorological drought analysis using copula theory and drought indicators under climate change scenarios (RCP). *Meteorological Applications* 27(1):e1856. doi:10.1002/met.1856.
- Newman M, Compo GP, Alexander MA (2003). ENSO-Forced Variability of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate* 16(23):3853–3857.
- Pavia EG, Graef F, Reyes J (2006). PDO–ENSO Effects in the Climate of Mexico. *Journal of Climate* 19(24):6433–6438. doi:10.1175/JCLI4045.1.
- Schober P, Boer C, Schwarte LA (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia* 126(5):1763–1768. doi:10.1213/ANE.0000000000002864.
- Thornthwaite CW (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38(1):55–94. doi:10.2307/210739.
- Sosa-Rodríguez FS, Constantino-Toto RM (2023). Sequía en México (Alejandro López Morcillo y Nayeli Amaya Pérez, Vol. 1) - Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, División de Ciencias Sociales y Humanidades. <https://redaguam.xoc.uam.mx/sequia-en-mexico/> [consultado el 15 de marzo de 2024].
- Valiente ÓM (2001). Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas* 26:59–80. doi:10.14198/INGEO2001.26.06.
- Vega-Camarena JP, Brito-Castillo L, Farfán LM, Gochis DJ, Pineda-Martínez LF, Díaz SC (2018). Ocean–atmosphere conditions related to severe and persistent droughts in the Mexican Altiplano. *International Journal of Climatology* 38(2):853–866. doi:10.1002/joc.5215.
- Vicente-Serrano S, Beguería S, López-Moreno JI (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23:1696–1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1.
- Vonk MA (2025). SPEI: A Python package for calculating and visualizing drought indices. *Journal of Open Source Software* 10(111):8454. doi:10.21105/joss.08454.