

Influencia de las oscilaciones climáticas AMO, PDO y ENSO en los patrones de precipitación en México: caso Sureste

Influence of AMO, PDO and ENSO Climate Oscillations on Precipitation Patterns in Mexico: Southeast case

Mercedes Andrade Velázquez^{1*}
Martín José Montero Martínez²

¹Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, México

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México

*Autora de correspondencia: mercedes.andrade@ccgs.mx

Editor encargado: Dr. Oscar Frausto Martínez

Editora invitada: Ana Cecilia Travieso Bello

Recibido: 15 de agosto de 2024 - Aceptado: 02 de octubre de 2024

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de las oscilaciones climáticas: oscilación multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés), oscilación decadal del Pacífico (PDO) y el Niño – oscilación del Sur (ENSO) en los patrones de precipitación en el sureste de México. Es bien sabido que el ENSO presenta una correlación inversa de la precipitación en esta región, aunque la alta dispersión de los eventos resulta en una señal débil de esta relación. Esta influencia se ve combinada con la fase de la PDO, fenómeno observado también en otras regiones de América, como Bolivia. No obstante, se ha resaltado la importancia de incluir la AMO en otros estudios. Para este trabajo, se utiliza el índice de precipitación estandarizado a 12 meses de la zona de estudio y su correlación con las oscilaciones climáticas. Los resultados de trabajos anteriores indican una influencia con las fases de ENSO en combinación con las otras oscilaciones en los eventos secos y húmedos de la región. Estos resultados aportan al conocimiento local del clima de la región y una metodología que se puede extrapolar a otras regiones.

Palabras clave: Climatología, Precipitación, Teleconexiones, Sureste de México, Sequía

Abstract

The objective of this work is to determine the influence of climate oscillations: Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO, for its acronym in English), Pacific Decadal Oscillation (PDO), and El Niño – Southern Oscillation (ENSO) in precipitation patterns in Southeastern Mexico. It is well known that ENSO presents an inverse correlation of precipitation in this region, although the high dispersion of the events results in a weak signal of this relationship. This influence is combined with the PDO phase, a phenomenon also observed in other regions of America, such as Bolivia. However, the importance of including AMO in other studies has been highlighted. This work uses the standardized 12-month precipitation index of the study area and its correlation with climatic oscillations. The results of previous work indicate an influence of the ENSO phases in combination with the other oscillations on the dry and wet events of the region. These results contribute to local knowledge of the region's climate and a methodology that can be extrapolated to other areas.

Keywords: Climatology, Precipitation, Teleconnections, Southeast of Mexico, Drought

Introducción

El presente trabajo se enfoca al estudio de los patrones de la precipitación en la región sureste de México, del período de tiempo 1971-2021. Estos patrones se determinan mediante el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés,) para posteriormente correlacionar con los índices climáticos de las teleconexiones: Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, siglas en inglés), Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO siglas en inglés) y El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, siglas en inglés;). El objetivo es determinar el grado de influencia de estas teleconexiones en la precipitación de la zona de estudio, de tal manera que se provea de información climática actualizada para uso de la población en general.

Las sequías en México han sido una constante a lo largo de la historia. Domínguez (2016) documenta la presencia de sequías desde la época prehispánica. Mismo autor también reporta las más importantes, que corresponden a los años 1960, 1962, 1969, 1977, 2009, 2011, 2012. En los últimos años se han presentado sequías importantes a nivel nacional, lo que ha llevado a los tomadores de decisiones a buscar información climática actualizada para poder afrontar los efectos de este fenómeno. Magaña et al. (1998) reportaron que la influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en los patrones de precipitación en México ocurren de la siguiente manera: durante la fase El Niño, se observa una disminución en la precipitación, mientras que durante la fase La Niña, se registra un aumento. Es decir, se tienen años secos y húmedos respectivamente. No obstante, Méndez y Magaña (2010) reportaron que la influencia del ENSO, no es aislada, sino que se tiene una combinación de fases entre ésta, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés), ocasionando un dipolo de influencia en el norte y sur de México. Es decir, cuando las fases positivas del ENSO y PDO coinciden, ocurren eventos de sequía en el sur y eventos húmedos en el norte del país. Mientras que cuando las fases frías se presentan, ocurren eventos húmedos (eventos de superávit de precipitación con respecto a la normal) en el sur y eventos de sequía (eventos con déficit de precipitación con respecto a la normal) en el norte del país. Ambas teleconexiones están presentes, junto con la fase de la AMO. Cuando el ENSO y la PDO no están en fase, los eventos asociados no ocurren o su intensidad se mantiene en el límite normal.

Esto muestra que la variabilidad climática de México está fuertemente influenciada por una serie de patrones climáticos de escala global y regional. Entre los más importantes se encuentran El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO).

El ENSO, conocido por sus fases de El Niño y La Niña, es uno de los principales moduladores de la variabilidad climática interanual en México. Durante los eventos de El Niño, generalmente se observa un incremento de la precipitación en el norte del país y una disminución en el sur, mientras que La Niña tiende a producir un efecto contrario (Magaña et al., 2003; Chen et al., 2004). Este fenómeno se ve complementado por la PDO, un patrón climático de variabilidad decadal en el Pacífico Norte, que puede amplificar o atenuar los efectos del ENSO en la precipitación (Mantua & Hare, 2002; Zhang et al., 1997).

Por otro lado, la AMO, que se caracteriza por fases de variación multidecadal de la temperatura del Atlántico Norte, ha sido identificada como un factor significativo en la modulación de la precipitación en las regiones del este de México, especialmente en la Península de Yucatán y el Golfo de México. Las fases cálidas de la AMO suelen estar asociadas con un aumento en las precipitaciones, mientras que las fases frías tienden a reducirlas (Enfield et al., 2001; Knight et al., 2006).

En conjunto, estos fenómenos climáticos interactúan de manera compleja, produciendo variaciones en los patrones de precipitación que pueden tener efectos significativos en el desarrollo socioeconómico y en la gestión de riesgos en México. La comprensión de estas interacciones es clave para mejorar las predicciones climáticas y diseñar estrategias de adaptación ante el cambio climático.

En el caso del sureste de México, Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez (2020), han reportado ya estudios sobre los patrones de precipitación mediante el SPI, encontrando una débil correlación entre los eventos húmedos con la fase La Niña y eventos secos con la fase El Niño, y a su vez con las fases de la PDO. Es por ello que el presente estudio se enfoca en determinar la correlación entre estas oscilaciones y la AMO con los patrones de precipitación mediante el SPI-12 y SPI-36.

Marco teórico

Andrade-Velázquez (2020) reporta en el estudio de la climatología de la precipitación en la zona sur, particularmente en zonas costeras, una comprensión de la vulnerabilidad por fenómenos hidrometeorológicos y climáticos a la que se exponen estas zonas a la influencia a fenómenos climáticos como son la PDO, AMO y ENSO, que a continuación se describen:

El Niño-Oscilación del Sur, se presenta como un sistema oceánico-atmosférico, que modula el clima. Es una combinación de cambios de presión en la atmósfera, conocido como Oscilación del Sur y cambios en la temperatura superficial del mar, El Niño, que ocurren en el océano Pacífico central y este ecuatorial. Sus fases son

neutra, fría (La Niña) y cálida (El Niño) y se monitorea mediante el índice oceánico del niño (ONI, por sus siglas en inglés). Este fenómeno tiene influencia en la precipitación a nivel mundial y particularmente en México (Méndez et al., 2010). Los desastres asociados son inundaciones y sequías.

La Oscilación Decadal del Pacífico es una oscilación de largo periodo en el océano Pacífico, sus efectos se presentan en la parte norte del océano Pacífico (Méndez et al., 2010). Se mide mediante las anomalías de la temperatura superficial del mar en esa zona, se manifiesta en fase positiva y negativa de la misma (Deser, et al., 2016). Su influencia es tipo ENSO con la de manera interanual.

La Oscilación Multidecadal del Atlántico, es una oscilación de largo periodo, aproximadamente de 20-40 años en el Océano Atlántico Norte, se mide por las anomalías de la temperatura superficial del mar, en fase fría y cálida. Sus efectos se perciben en el Atlántico desde el Ecuador hasta Groenlandia. Se le asocia con fuertes lluvias y sequías. La Agencia Nacional de Atmósfera y Océano de Estados Unidos de América (NOAA, 2019) sugiere que la fase positiva se vincula con huracanes en esa zona de mayor intensidad.

Estos fenómenos modulan los patrones de precipitación en distintas regiones del país, afectando tanto la cantidad como la distribución temporal y espacial de las lluvias, lo que a su vez tiene importantes implicaciones para la agricultura, los recursos hídricos y la gestión de desastres naturales.

Se propone el empleo del Índice Estandarizado de Precipitación, sugerido por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) para determinar eventos de sequía (WMO, 2012). El SPI se calcula mediante la ecuación de distribución Pearson tipo III (Guttman, 1999):

$$f(x) = \frac{1}{a\Gamma} \frac{(x-a)^{b-1}}{a} \exp\left(\frac{-(x-c)}{a}\right) \quad \text{ec. 1}$$

Donde:

a, b > 0 para los parámetros de escala y forma, y

0 < c < x para el parámetro de ubicación

Γ es la función gamma

El SPI toma valores entre -2 y 2, los cuales se describen en la **Tabla 1**.

Para lograr el objetivo del estudio se usó la correlación de Pearson:

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sqrt{\text{Var}(x)\text{Var}(y)}} \quad \text{ec. 2}$$

donde Cov es la covarianza de X, Y y Var es la varianza de X y Y, respectivamente.

Tabla 1. Valores del Índice Estandarizado de Precipitación y su clasificación

SPI Valor	Clasificación
≥ 2.0	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Severamente húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal
-1.49 a -1.0	Moderadamente seco
-1.99 a -1.5	Severamente seco
≤ -2.0	Extremadamente seco

SPI: Índice estandarizado de precipitación

Fuente: Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez, 2020

Metodología

a) Zona de estudio

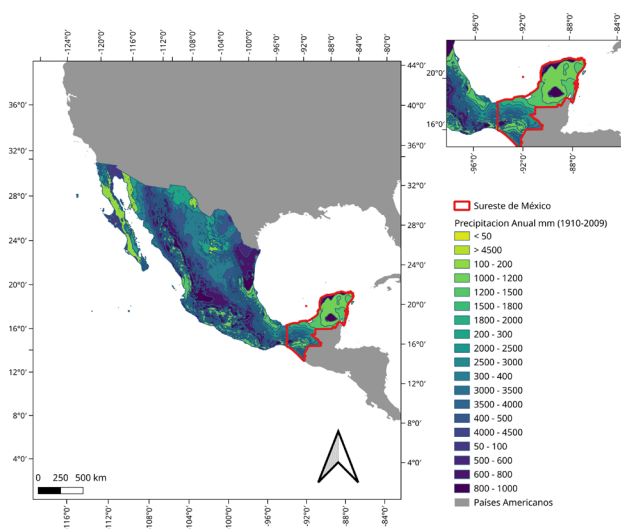
El sureste de México se conforma por los estados de Tabasco, Chiapas, Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Son estados donde predomina un clima cálido – húmedo (Aw) de acuerdo con García, (2004). Tabasco y Chiapas, concentran dos grandes ríos que conforman la cuenca Grijalva-Usumacinta, con un 30 % de escorrentía a nivel nacional (BID, 2013). Los suelos en Tabasco son arcillosos y planos (Gama et al., 2010), mientras que Chiapas cuenta con un relieve diverso en su territorio, entre montañas y valles (Gallardo et al., 2019). La Península de Yucatán cuenta con suelos planos y ríos subterráneos (CONAGUA, 2024). No obstante, la vegetación en todo el sureste es abundante y cuenta con una gran diversidad biológica (Velázquez-Salazar et al., 2021). Esto ha propiciado construcciones para fomentar el turismo en la región, y, durante el 2018-2024 esta zona ha sido grandemente interferida por el proyecto gubernamental “Tren Maya” (Tren Maya, 2023). Sí bien la zona ha sufrido deforestación también se ha puesto atención en su conservación y reforestación en el mismo periodo de tiempo. Además de contar con una gran diversidad de construcciones prehispánicas de la cultura maya (INAH, 2024) (**Figura 1**).

b) Datos

La información se seleccionó de la base de datos de ERA5 (Hersbach et al., 2023), cuya resolución es de 0.25° x 0.25°. La variable empleada es la precipitación total, que cubre el periodo de tiempo de 1971 a 2021 en una ventana

de datos diarios. Esta base de datos ha sido reportada como adecuada para la zona de estudio (Stewart et al., 2021). Se procedió a convertir a la información en datos mensuales y anuales mediante promedios para cada respectivamente. Posteriormente para el análisis de eventos húmedos y secos, se utilizó el índice estandarizado de precipitación (WMO, 2012) para su cálculo en promedios anuales. También se usaron los índices oceánicos Oceanic Niño Index (ONI, derivado de las anomalías de la temperatura superficial del mar en 5N-5S de la base de datos ERSST.v5 en la región del Niño 3.4; Huang, et al., 2017), AMO (North Atlantic 0-60N SSTA derivado de ERSST.v5; Enfield, et al., 2001) y PDO derivado de las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Norte (20N-70N) de la base de datos ERSST V5 (Newman et al. (2016); estos datos fueron empleados en el presente estudio por su amplia cobertura en tiempo, confiabilidad en su determinación y su disponibilidad en la NOAA (2024). Estos índices son ampliamente usados y con excepción del índice para el ENSO, qué cuenta con varias alternativas (MEI, Tri; Pompa-García & Némiga, 2015), para los propósitos del presente trabajo hemos optado por ONI. Se hace notar que estos índices fueron promediados a una ventana anual para hacer los estudios de correlación con el SPI en la región de estudio.

Figura 1. Mapa de precipitación anual para México y se indica la zona del presente estudio en polígono rojo



Fuente: Conabio, 2024

Resultados

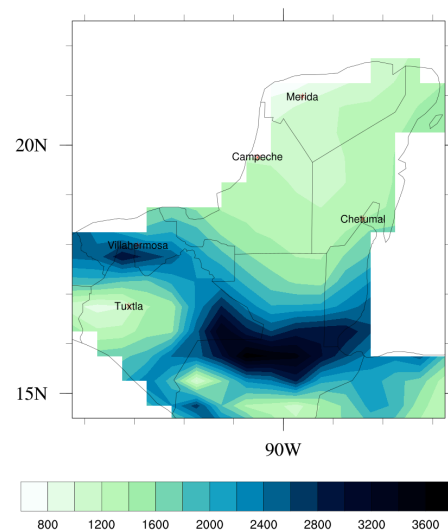
a) Precipitación

Se calculó la climatología de la precipitación acumulada por mes para el periodo de estudio (1971-2021).

Podemos observar que el estado de Tabasco y sureste de Chiapas concentran la mayor cantidad de precipitación alcanzando entre 180 mm/mes a 300 mm/mes. Mientras que la Península de Yucatán y el suroeste de Chiapas alcanzan una precipitación media al mes de entre 60 a 120 mm/mes. Esto nos permite identificar la zona más lluviosa del sureste de México (**Figura 2**). En esta zona corre el río Usumacinta, cuya región goza de una buena cobertura vegetal en la parte de México, ya que la parte de Guatemala ha sido severamente intervenida.

Por otro lado, en la cuenca del Grijalva, la zona más lluviosa se encuentra en los límites de Tabasco y Chiapas, cercano a la ciudad de Villahermosa. Es importante mencionar que Villahermosa ha sido frecuentemente afectada por inundaciones. Arreguín y colaboradores (2014) reportan las más importantes en los años de 1995, 1997, 2007, 2008 y 2010.

Figura 2. Mapa de climatología de 1971 a 2021 para la precipitación anual acumulada en mm/me

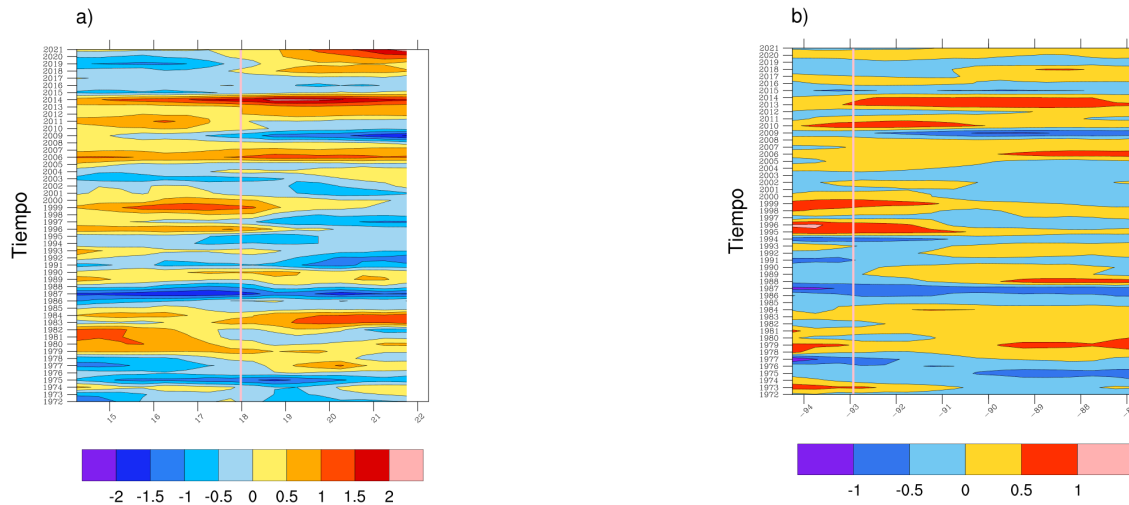


b) Índice estandarizado de precipitación

El cálculo del SPI-12 nos permite determinar los eventos húmedos y secos en la zona de estudio, de manera promediada arialmente, pero también se determina espacialmente. Las **Figuras 3a** y **3b** muestran el SPI-12 a lo largo del periodo de tiempo del estudio (1971 a 2021) *versus* la latitud y la longitud, respectivamente.

Se observa que en el caso de las inundaciones de los años que reportan Arreguín y colaboradores (2014) los eventos húmedos se encuentran al norte de la región, mientras que los eventos secos fueron identificados al sur de la región, principalmente en los años de 1972 a 1982 y 2006 a 2015. Por otro lado, la **Figura 3b** muestra que hacia el este

Figura 3. SPI-12 versus latitud (a) y longitud (b) del dominio analizado a lo largo del periodo de estudio 1971 a 2021. La línea en rosa indica las coordenadas de Villahermosa, Tabasco



de la zona de estudio hubo una gran sequía para los finales de las décadas de 1970 y principios de la de 1980, al igual que para principios de la de 2010. Y en la región oeste de la zona de estudio tenemos grandes eventos húmedos a finales del decenio de 1980 y principio del de 1990, así como a principio del de 2000. Villahermosa, muestra grandes eventos húmedos alrededor de 1975-1977 y 1986-1990.

c) Teleconexiones

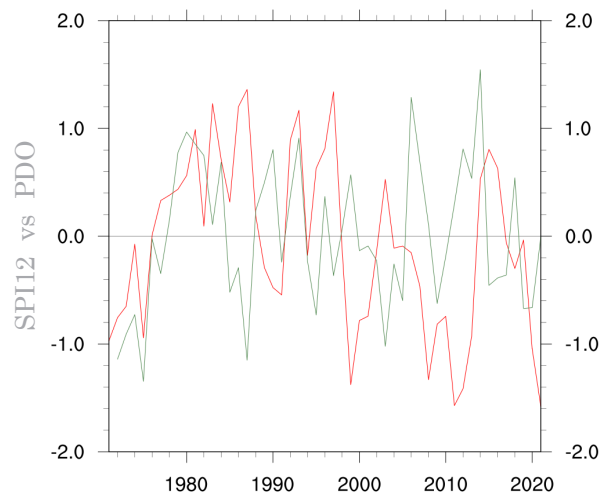
1) Oscilación decadal del Pacífico

Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez (2020) han reportado una débil correlación entre los periodos húmedos y secos de la cuenca Grijalva-Usumacinta con la PDO. En la **Figura 4**, se grafican las fases de la PDO para el periodo de estudio 1971-2021, al igual que el SPI-12 promediado para la zona sureste de México. Esto con la finalidad de determinar si los eventos húmedos y secos en la zona de estudio se presentan en las fases frías y cálidas respectivamente de la PDO, tal como lo reportan Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez (2020). Podemos observar que de 1971 a 1985, la fase cálida de PDO está presente y ocurren periodos húmedos en la zona. Esto se repite para los años 1992-1994. Pero el resto de los eventos húmedos, la PDO se encuentra en fase fría, coincidiendo con el resultado de Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez (2020). Aunado a esto, también se observa que los eventos secos ocurren en las fases cálidas de PDO, en los años 1989-1992, 1998-2002, 2010 a 2014.

2) Oscilación multidecadal del Atlántico

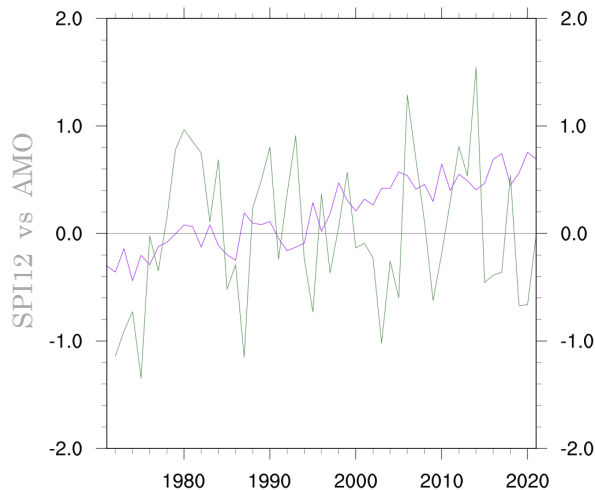
En el caso de la AMO (**Figura 5**) se observa que durante 1971 a 1994 la fase fría se mantuvo, cambiando a fase

Figura 4. Gráfica temporal en el periodo de estudio 1971 a 2021 de SPI-12 (en verde) y PDO (en rojo)



cálida posterior a 1994 hasta el último registro. En este caso, no podemos observar alguna influencia en la precipitación, de acuerdo con el SPI-12. Por lo que es conveniente realizar este ejercicio con un SPI de ventana mayor, el SPI-36. No obstante, después de la transición de fase de la AMO, PDO muestra mayor anticorrelación con la precipitación. Cabe mencionar que Méndez y Magaña (2010) reportaron que el dipolo geográfico de precipitación en México obedece a una combinación entre las tres oscilaciones presentadas en este estudio (AMO, PDO y ENSO).

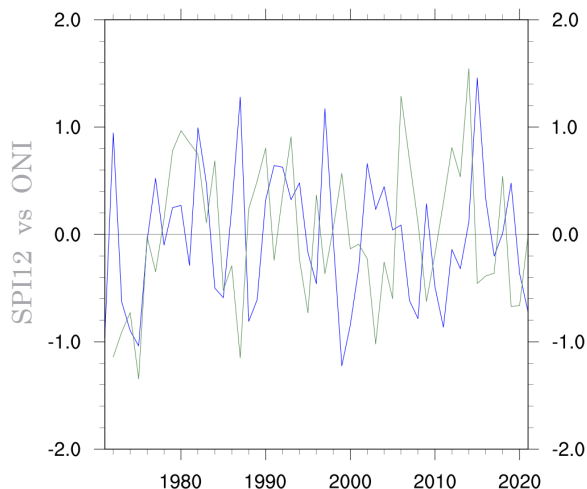
Figura 5. Gráfica temporal en el periodo de estudio 1971 a 2021 de SPI-12 (en verde) y AMO (en morado)



3) El Niño – oscilación del Sur

En la **Figura 6** se observa que la anticorrelación del SPI-12 con el ONI, índice del ENSO está presente. Se observa que los eventos húmedos coinciden con la fase fría del ENSO, conocida como La Niña, mientras que los eventos secos se asocian con la fase cálida, es decir, El Niño. Esto ha sido señalado también por Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez (2020), así como por Andrade-Velázquez y colaboradores (2021).

Figura 6. Gráfica temporal en el periodo de estudio 1971 a 2021 de SPI-12 (en verde) y ONI (en azul)



Discusión

Los resultados del SPI-12 muestran concordancia con autores previos que reportan eventos secos y húmedos en diferentes puntos de la zona de estudio, tales como Arreguín et al. (2014), Valdés-Manzanilla, (2016) y Domínguez, (2016). Esto refuerza la técnica aplicada para toda la zona de estudio. Otro de los resultados interesantes que muestra el presente estudio es la anticorrelación entre las fases de PDO y ENSO con el SPI-12, como son Méndez y Magaña (2010), Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez, (2020), Andrade-Velázquez et al. (2021). Estos también han sido señalados anteriormente por Magaña y colaboradores (2003), Chen y colaboradores (2004), y Kossin y colaboradores (2010). En el mismo sentido se sumó la presencia de la AMO y no se encontraron correlaciones relevantes, a pesar de que el periodo de estudio 1971 a 2021 cuenta con cambio de fase de la AMO, como lo indican Méndez y Magaña (2010).

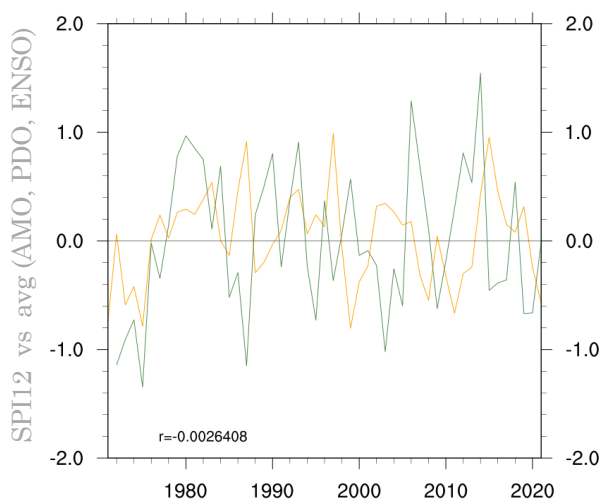
Calculando la correlación entre las oscilaciones y el SPI-12, se confirma la anticorrelación con ENSO, pero no es así con PDO y AMO. Aunque las gráficas muestran esta antirrelación, la correlación de Pearson muestra que existe una correlación directa baja (ver **Tabla 2**), mientras que haciendo la combinación promediada de las tres oscilaciones (esto se hace, dado el comportamiento similar de los índices climáticos para las oscilaciones), sí muestran esta anticorrelación. Esto se debe a la alta anticorrelación de ENSO, que predomina en esta combinación (**Figura 7**). Esto puede deberse a que la señal de ENSO es de alta frecuencia, mientras que PDO es de más baja frecuencia (Andrade-Velázquez et al., 2021). Se ha planteado este análisis de combinación a partir de la propuesta de dipolo que reportan Méndez y Magaña, (2010).

Hay que mencionar que esta zona que es afectada por ciclones tropicales, para la parte sur, estos fenómenos provienen del océano Pacífico (Dominguez et al., 2021). Y estos son más frecuentes en el océano Atlántico cuando hay fase La Niña del ENSO (Magaña et al., 1998, Andrade-Velázquez, 2017), mientras que la NOAA reporta que cuando la fase cálida de la AMO es activa, los huracanes en el Atlántico son más frecuentes (NOAA, 2019). Otros de los fenómenos hidrometeorológicos son los frentes fríos, estos son más recurrentes en fase La Niña que en fase El Niño (Magaña et al., 2009). La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) también es influenciada por estas oscilaciones, modificando la cantidad de precipitación en la zona de estudio. Sáenz y colaboradores (2022) reportan que en fases frías aumenta la precipitación en la región.

Un estudio reciente, revisó la influencia individual y combinada de ENSO, AMO y PDO en los periodos secos de México (Mijares-Fajardo y Martínez-Austria, 2023). Mediante una revisión sistemática de más de 70 documentos usando la metodología PRISMA, el estudio reporta coincidencias clave: La Niña (El Niño) provoca

Tabla 2. Correlación de Pearson entre el SPI-12, las oscilaciones ENSO, PDO, AMO y su combinación promedio

Correlación "r"	ENSO/significancia	PDO/significancia	AMO/significancia	AVG (ENSO, PDO, AMO)/ significancia
SPI-12	-0.116/0.415	0.042/0.765	0.075/0.599	-0.003/0.985
SPI-36	0.367/0.007	0.298/0.033	0.012/0.930	0.398/0.004

Figura 7. Gráfica temporal en el periodo de estudio 1971 a 2021 de SPI-12 (en verde) y la combinación promediada de las oscilaciones (en naranja)

condiciones secas (húmedas) en el norte de México, tanto en invierno como en verano. Además, en esta región, AMO+ (fase positiva de la AMO) se asocia con sequías en verano y PDO- (fase negativa de la PDO) en invierno. Para el centro y sur de México, El Niño genera sequías, mientras que La Niña aumenta la humedad. En estas zonas, AMO- (AMO+) y PDO+ también tienen efectos en las condiciones de sequía (humedad).

Otro trabajo notable estudió la influencia del ENSO, la PDO y la AMO en la precipitación extrema del norte de México asociada y no-asociada con ciclones tropicales (Llanes-Cárdenas et al., 2020). Después de analizar tendencias no paramétricas, no se encontraron tendencias estadísticamente significativas; sin embargo, las tendencias lineales indicaron una leve tendencia positiva en los ciclones tropicales en la región costera del sur de Sonora y norte de Sinaloa. Los resultados también sugieren que las tendencias

de precipitación están más influenciadas por las anomalías relacionadas con ENSO que por las anomalías PDO y AMO.

En el caso de ENSO bajo la influencia del forzamiento antropogénico, hasta ahora no hay una claridad (Yeh, et al., 2018; Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez 2021). Esto en parte se debe a la incertidumbre asociada a las proyecciones de los modelos de circulación general.

Conclusiones

El presente trabajo hace un análisis sobre los patrones de precipitación definidos mediante el SPI-12 para correlacionar con las grandes oscilaciones climáticas AMO, PDO y ENSO, recurrente llamadas en la influencia del clima local. Se muestra que si bien en el periodo de estudio 1971 a 2021 (51 años) existe concordancia entre las fases frías de ENSO y PDO con los eventos húmedos, la correlación de Pearson muestra esto solo para el fenómeno ENSO. Cabe mencionar que ENSO es de alta frecuencia, lo que tiene mejor respuesta a los cambios anuales, como lo muestra el SPI-12. La anticorrelación de ENSO con la precipitación encontrada en este estudio para la zona sur-sureste de México contribuye al conocimiento del clima local. Si bien AMO parece no tener influencia relevante, el estudio con ventanas diferentes del SPI para comparar las señales de AMO y PDO, tal como 36 meses, permitió observar que AMO mostró mejor correlación. Consideramos que la AMO pueda abarcar un periodo de estudio mayor (> 50 años). Por otro lado, en ventana de 36 meses la correlación de ENSO es positiva, este resultado debe tomarse con precaución, ya que como se mencionó ENSO es una oscilación de alta frecuencia. En la combinación de las oscilaciones y SPI-36 sigue predominando la señal de ENSO. Los resultados presentados son una primera base para estudios de clima en la región sureste de México que contribuyen a la comprensión del comportamiento de la precipitación en la zona. No obstante, se requiere continuar con estudios climáticos locales y su respuesta a los forzamientos naturales y antropogénicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Red Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) y a los Laboratorios Nacionales LaNCAC y LANRESC. También se agradece al programa de Investigadores por México y al Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad, así como a la Unión Geofísica Mexicana.

Referencias

- Andrade-Velázquez, M. (2017). Visión climática de la precipitación en la cuenca del Río Usumacinta. In: Soares, D., García, G.A., Eds. *La Cuenca del Río Usumacinta desde la Perspectiva del Cambio Climático*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: 1–417.
- Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O. R. (2020). Precipitation patterns in Usumacinta and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate. *Revista Bio Ciencias*, 7, e905. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e905>
- Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O.R. (2021). Historical precipitation patterns in the South-Southeast region of Mexico and future projections. *Earth Sci Res J*, 25, 69–84.
- Arreguín-Cortés, F. I., Rubio-Gutiérrez, H., Domínguez-Mora, R., De Luna-Cruz, F. (2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3), 05-32. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/424>
- BID. (2013). *Diagnóstico integrado con identificación de áreas prioritarias del PAOM. Resumen Ejecutivo*. Banco Interamericano de Desarrollo. https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/OTBID/Volumen1_PAOM_Diagn%C3%B3stico_ResumenEjecutivo.pdf
- Chen, J., Wilson, C. R., & Tapley, B. D. (2004). Interannual variability of the low-degree gravitational field from GRACE. *Geophysical Research Letters*, 31(L22607), 1-4.
- CONAGUA. (2024). *Plan Nacional Hídrico. Región Hidrológica Administrativa XII*. https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_XII_Pen%C3%ADnsula_de_Yucat%C3%A1n.pdf
- Deser, C., Trenberth, K. y National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2016). *The Climate Data Guide: Pacific Decadal Oscillation (PDO): Definition and Indices*.
- Domínguez, J. (September-October, 2016). Different Perspectives on Drought: A Historical Review of the Mexican Case. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(5), 77-93.
- Domínguez, C., Jaramillo, A., Cuéllar, P. (2021). Are the socioeconomic impacts associated with tropical cyclones in Mexico exacerbated by local vulnerability and ENSO conditions? *Int J Climatol*, 41, E3307–E3324.
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., & Trimble, P. J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077-2080.
- Gallardo-Cruz, J.A., Fernández-Montes de Oca, A., and Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2):82. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/1611>
- Gama, L., Ordoñez, E.M., Villanueva-García, C., Ortiz-Pérez, M. A., López, H. D., Torres, R. C., Valadez, M. E. M. (2010). Floods in Tabasco Mexico: history and perspectives. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 133. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/133/21017>
- García, E. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*, 5th ed. Instituto de Geografía, UNAM: Ciudad de México, México, 2004; Available online: <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., et al. (2023). *ERA5 Hourly Data on Pressure Levels from 1940 to Present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Available online: <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
- Huang, B., Peter W. Thorne, et. Al. (2017). Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 30, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1
- INAH. (2024). *Región Cultural Sureste (Área Maya)*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. <https://lugares.inah.gob.mx/es/zonas-arqueologicas/regiones-culturales/cultura/14285-sureste.html>
- Knight, J. R., Folland, C. K., & Scaife, A. A. (2006). Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation. *Geophysical Research Letters*, 33(L17706), 1-4.
- Kossin, J. P., Camargo, S. J., & Sitkowski, M. (2010). Climate modulation of north atlantic hurricane tracks. *Journal of Climate*, 23(11), 3057–3076. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3497.1>
- Llanes-Cárdenas, O., Norzagaray-Campos, M., Gaxiola, A., & González, G. E. G. (2020). Regional precipitation teleconnected with PDO-AMO-ENSO in northern Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 667-681.
- Magaña, V., Pérez, J. L., Conde, C. (1998). El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur y sus impactos en México. *Revista Ciencias*, 51, pp. 14-18.
- Magaña, V., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313-330.
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58(1), 35-44.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scale*. In Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184. http://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- 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.

- Méndez, M., & Magaña, M. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23, 1175–1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>
- Mijares-Fajardo, R. & Martínez-Austria, P. F. (2021). Influences of ENSO, AMO, and PDO over Dry Periods in Mexico: A Systematic Review (1984–2020). En *Technology, Science and Culture: A Global Vision, Volume IV*. UDLAP, Puebla, Puebla, México, 251-273.
- Newman, M., Alexander, M. A., Ault, T. R., Cobb, K. M., Deser, C., Di Lorenzo, E., et al. (2016). The Pacific Decadal Oscillation, Revisited. *Journal of Climate*, 29(12), 4399–4427, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0508.1>.
- NOAA. (2019). *National Oceanic & Atmospheric Administration. Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory*. Sitio visitado en febrero 2019: http://www.aoml.noaa.gov/phod/amo_faq.php.
- Pompa-García, M. & Némiga, A.X. (2015). ENSO index teleconnection with seasonal precipitation in a temperate ecosystem of Northern Mexico *Atmósfera*, 28 (2015), 43-50.
- Sáenz F, Hidalgo HG, Muñoz ÁG, Alfaro EJ, Amador JA, Vázquez-Aguirre JL. (2022). Atmospheric circulation types controlling rainfall in the Central American Isthmus. *Int J Climatol*, 43(1):197–218. <https://doi.org/10.1002/joc.7745>
- Secretaría de Turismo y Fonatur. Gobierno de México. (2023). *Tren Maya*. Available online: <https://www.gob.mx/trenmaya>
- Stewart, I.T., Maurer, E.P., Stahl, K. and Joseph, K. (2021). Recent evidence for warmer and drier growing seasons in climate sensitive regions of Central America from multiple global datasets. *International Journal of Climatology*, 42, 1399–1417. <https://doi.org/10.1002/joc.7310>
- Valdés-Manzanilla, A. (2016). Historical floods in Tabasco and Chiapas during sixteenth–twentieth centuries. *Natural Hazards*, 80:1563–1577. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2039-5>
- Velázquez-Salazar S., Rodríguez-Zúñiga M.T., Alcántara-Maya J.A., Villeda-Chávez E., Valderrama-Landeros L., Troche-Souza C., et al. (2021). *Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. México CDMX. Pp. 168 https://ceiba.org.mx/publicaciones/Mares_y_costas/2020_Manglares.de.Mexico_CONABIO.pdf
- WMO. (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario*. OMM-N 1090.
- Yeh, S.-W., Cai, W., Min, S.-K., McPhaden, M. J., Dommenges, D., Dewitte, B., et al. (2018). ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing. *Reviews of Geophysics*, 56, 185–206. <https://doi.org/10.1002/2017RG000568>

