



Precipitation patterns in Usumacinta and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate

Patrones de precipitación en las cuencas Usumacinta y Grijalva (sur de México) bajo un clima cambiante

Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O. R.*

Cátedra CONACYT–Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS).
Calle Centenario Instituto Juárez S/N, Col. Reforma, C.P. 86080, Villahermosa, Tabasco, México.

Cite this paper/Como citar este artículo: 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>



ABSTRACT

The Usumacinta and Grijalva basins of Mexico are characterized by their high water and natural wealth. They gather a great part of the biodiversity and are responsible for 30 % of the total surface runoff in Mexico. However, southeastern Mexico is recognized to present a high degree of socioeconomic vulnerability and climatic risk. Thus, since climatic data in tropical zones are scarce for climate knowledge and understanding, it is essential to analyze changes in precipitation patterns as a critical variable of climate. The present study analyzed the behavior of precipitation patterns using the Standardized Precipitation Index (SPI) for the period from 1960 to 2016 in the Grijalva and Usumacinta basins. Wet events were confirmed to occur during negative phases of the Pacific Decadal Oscillation

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: December 15th 2019.

Accepted/Aceptado: July 10th 2020.

Available on line/Publicado: August 13th 2020.

*Corresponding Author:

Ojilve Ramón Medrano-Pérez, Cátedra CONACYT–Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS). Villahermosa, Tabasco, México. E-mail: ojilve.medrano@ccgs.mx

RESUMEN

Las cuencas Usumacinta y Grijalva se caracterizan por su alta riqueza hídrica y natural, no solo reúnen gran parte de la biodiversidad, sino que también son responsables del 30 % del escurrimiento superficial total del país. No obstante, se reconoce al sureste mexicano por su alto grado de vulnerabilidad socioeconómica y riesgo climático. En tal sentido, si bien en las zonas tropicales los datos climáticos son escasos, para el conocimiento y comprensión del clima, es fundamental analizar los cambios de los patrones de precipitaciones como una variable crítica del clima. El presente estudio analiza el comportamiento de los patrones de precipitaciones mediante el uso del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para el periodo de 1960 a 2016 en las cuencas de Grijalva y Usumacinta. Se confirma que eventos húmedos ocurren en las fases negativas de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), mientras que los eventos secos ocurren en fases positivas, respectivamente. Adicionalmente, las cuencas han estado sometidas a distintos procesos de degradación ambiental,

(PDO) and the El Niño Southern Oscillation (ENSO), whereas dry events occurred during their positive phases, respectively. In addition, the basins have been subjected to different environmental degradation processes, observed to a greater or lesser extent in each of the basins and parts of the countries involved. Thereby, climate change did not represent the only pressure on the natural resources of the area, since intense processes of degradation of vegetation cover and deforestation, among others, have been observed, and this pressure can be exacerbated by the effects of climate change.

KEY WORDS

Tropical transboundary basins, climate variability, environment, precipitation, deforestation.

Introduction

Due to global warming, climate change has become the greatest threat to society during the 21st century, since the interconnected nature of risks associated with this change affects countless sectors and areas of human life (Mora *et al.*, 2018). Recent scientific studies such as IPCC (2018) and Mora *et al.* (2018) showed that climate change and variability can adversely impact human health, ecosystems and various socioeconomic sectors. In this context, vital aspects of development and social welfare, such as food production, coastal areas, human settlements, water resources, infrastructure and security are and will be affected by such phenomena. Nonetheless, climate change represents an additional factor that, along with the growing demand for resources, land-use change and pollution, are pressuring natural systems. Climate change will not affect everyone to the same degree; developing countries and the most vulnerable social groups will be the most affected (Mateos *et al.*, 2016). In the Mesoamerican and Caribbean regions, challenges in this regard are growing (González *et al.*, 2017; Muñoz-Jiménez *et al.*, 2019).

Therefore, in the context of global change and its effects on the hydrological cycle, water resource management is a worldwide challenge by facing some of the most serious problems in water resources at short-term, such as the growth in water demand, water pollution, climate change, and disturbances of the ecosystems (Magaña *et al.*, 2018).

observados en mayor o menor medida en cada una de las cuencas y porciones de los países involucrados. Así, el cambio climático no representa la única presión sobre los recursos naturales de la zona, puesto que se han observado intensos procesos de degradación de la cobertura vegetal y de deforestación, entre otros, y esa presión puede verse exacerbada por los efectos del cambio climático.

PALABRAS CLAVE

Cuencas transfronterizas tropicales, variabilidad climática, ambiente, precipitación, deforestación.

Introducción

El cambio climático debido al calentamiento global se ha vuelto la mayor amenaza del siglo 21 para la sociedad, puesto que la naturaleza interconectada de los riesgos asociados a este cambio afecta a innumerables sectores y áreas de actividad humana (Mora *et al.*, 2018). Estudios científicos recientes tal como IPCC (2018) y Mora *et al.* (2018) han demostrado que los cambios y la variabilidad climática pueden impactar negativamente en la salud humana, los ecosistemas, y varios sectores socioeconómicos. En este contexto, aspectos vitales para el desarrollo y el bienestar social, como la producción de alimentos, las áreas costeras, los asentamientos humanos, los recursos hídricos, la infraestructura y la seguridad son y serán afectados por tales fenómenos. No obstante, el cambio climático representa un factor adicional, el cual presiona a los sistemas naturales en conjunto con la demanda creciente para recursos, el cambio de uso del suelo y la contaminación. El cambio climático no afectará a todos en la misma medida; los países en desarrollo y los grupos sociales más vulnerables serán los más afectados (Mateos *et al.*, 2016). En las regiones de Mesoamérica y del Caribe, van creciendo los retos en lo que a esto respecta (González *et al.*, 2017; Muñoz-Jiménez *et al.*, 2019).

Por lo tanto, en el contexto de cambio global y sus efectos sobre el ciclo hidrológico, la gestión de recursos hídricos representa un reto mundial al enfrentarse con uno de los problemas más serios en los recursos hídricos a corto plazo, como el crecimiento de la demanda de agua, la contaminación del agua, el cambio climático y las perturbaciones de los ecosistemas (Magaña *et al.*, 2018). La disponibilidad de agua y los cambios en precipitaciones evidenciados por las sequías y el agotamiento de los acuíferos impacta

The availability of water and changes in precipitation, as evidenced by droughts and aquifer depletion, substantially impacts both urban and rural areas (Duran-Encalada *et al.*, 2017). Mexico is considered one of the most susceptible countries because of its strong vulnerability to the adverse effects of climate change. According to Molina *et al.* (2017), 15 % of the national territory, 68 % of the population, and 71 % of the Gross Domestic Product (GDP) are extremely exposed to direct adverse effects of climate change. Climate variability is related to natural events such as floods and tropical storms, adverse effects of activities such as agriculture and hydroelectric generation, and socioeconomic losses throughout Mexico (Landa *et al.*, 2008; Magaña *et al.*, 2001). In particular, the southern border presents a great exposure to impacts of climate variability and climate change, where floods represent one of the major problems in the transboundary basins of this area (García & Kauffer, 2011; Kauffer, 2006). However, both institutional and socioeconomic response capacities to these phenomena in the area are considered to be limited (CAFS, 2018). This situation is not exclusive of Mexico, because challenges in this area are shared to a greater or lesser extent by other countries in the region.

In this context, south-eastern Mexico has an extensive natural wealth, including water resources, which are mainly within the Grijalva and Usumacinta basins (Cruz-Paz *et al.*, 2018; García & Kauffer, 2011), these basins are geographically adjacent. The modulators of climate variables, such as precipitation in this region, are mainly waves and tropical cyclones during summer and cold fronts in winter (Andrade-Velázquez, 2017). Precipitation behaviour can be assessed by the standardized precipitation index (SPI), which provides information on wet and dry periods in a region (Santana *et al.*, 2017). This information is necessary to determine changes in regional precipitation patterns at different time scales, *e.g.*, seasonal, annual or greater periodicity. Nonetheless, climate data in Mexico and tropical areas are scarce, and their quantitative and qualitative availability has resulted in very few studies on the evidence and trends of climate change in the country (Duncan-Golicher & Morales, 2005; Montero-Martínez *et al.*, 2018). In different regions, reanalysis data have been used to supply the observation records (Cavazos *et al.*, 2019). This posed a challenge to the present investigation, because knowing and understanding the climate is essential to analyse precipitation changes as a critical climate variable.

de manera substancial en áreas urbanas como rurales (Duran-Encalada *et al.*, 2017). México está considerado como uno de los países más susceptibles por su alta vulnerabilidad a los efectos negativos del cambio climático. Según Molina *et al.* (2017), 15 % del territorio nacional, 68 % de la población y 71 % del Producto Interno Bruto (GDP) están extremadamente expuestos a los efectos negativos directos del cambio climático. La variabilidad climática está relacionada a eventos naturales como son las inundaciones y las tormentas tropicales, a efectos negativos en actividades como la agricultura y la producción hidroeléctrica y pérdidas socioeconómicas en todo México (Landa *et al.*, 2008; Magaña *et al.*, 2001). En particular, la frontera sur tiene una alta exposición a los impactos de la variabilidad climatológica y del cambio climático, donde las inundaciones representan uno de los mayores problemas en las cuencas transfronterizas de esta área (García & Kauffer, 2011; Kauffer, 2006). Sin embargo, las capacidades de respuesta institucional y socioeconómica a estos fenómenos están consideradas como limitadas en esta área (CAFS, 2018). Esta situación no es exclusiva de México, puesto que los retos en esta área son compartidos en mayor o menor medida por otros países de la región.

En este contexto, el sureste de México tiene una extensa riqueza natural, incluyendo recursos hídricos, los cuales están principalmente en las cuencas Grijalva y Usumacinta (Cruz-Paz *et al.*, 2018; García & Kauffer, 2011), estas cuencas son geográficamente adyacentes. Los moduladores de variables climatológicas como las precipitaciones en esta región son principalmente ondas del este y ciclones tropicales durante el verano y frentes fríos durante el invierno (Andrade-Velázquez, 2017). El comportamiento de las precipitaciones puede ser evaluado por el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés), el cual provee información sobre los periodos húmedos y secos en la región (Santana *et al.*, 2017). Esta información es necesaria para determinar cambios en los patrones regionales de precipitación a diferentes escalas de tiempo, *e.g.*, estacional, anual o de mayor periodicidad. Sin embargo, los datos climatológicos en México y en áreas tropicales son escasos, y su disponibilidad cuantitativa y cualitativa ha dado como resultado muy pocos estudios sobre la evidencia y las tendencias de cambio climático en el país (Duncan-Golicher & Morales, 2005; Montero-Martínez *et al.*, 2018). En diferentes regiones, el re-análisis de datos ha sido usado para suministrar los registros de observación (Cavazos *et al.*, 2019). Eso plantea un reto para la presente investigación, puesto que el conocimiento y la comprensión del clima son esenciales para analizar los cambios de precipitación como una variable climatológica crítica.

In this perspective, the present study explored and analysed precipitation patterns in the Usumacinta and Grijalva transboundary basins from a natural point of view, *i.e.*, involving natural and hydrographic delineation of these water spaces including Guatemala and Belize. Thus, because the Mexican side is a receiving basin, the present study sought to understand rainfall patterns in these basins, which are represented as a natural unit. Therefore, the study aimed to increase the knowledge and to promote climate resilience in the region. On this basis, we concluded that our approach can promote not only research on the subject, highlighting the knowledge generation for basins under various contexts, but also the decision-making of those basins involved in the challenges of water resource management in the study area.

Materials and Methods

Study Area

The southern border area of Mexico comprises six watersheds covering a total area of ~168,349 km² (Usumacinta, Grijalva, Candelaria, Hondo, Suchiate, and Coatán basins), which extends across Mexico, Guatemala and Belize. In particular, the Grijalva and Usumacinta basins (which together are called the entire basin hereafter) have great natural capital, because of their importance, extent and hydrological development. The area of the Usumacinta basin (72,118 km²) is divided between Mexico (42 %) and Guatemala (58 %), with a lesser proportion in Belize (0.0002 %). Of the Grijalva Basin area (57,682 km²), 90.5 % is estimated to be in Mexico and 9.5 % in Guatemala. Within Mexico, the Grijalva and Usumacinta basins have a total area of 82,478 km² or 4.2 % of the country's continental territory. The administrative distribution of the two basins in Mexico includes the states of Tabasco, Chiapas, and a small part of Campeche (Figure 1).

The Grijalva and Usumacinta basins comprise not only one of the regions with tremendous biological and cultural diversity but are also the headwaters of important rivers. These rivers include the Usumacinta, Grijalva, San Pedro, and Lacatún. In fact, the Usumacinta River has the greatest flow in Mesoamerica, estimated at 1,700 m³/s (March-Mifsut & Castro, 2010). Indeed, the Grijalva-Usumacinta hydrologic system is responsible for 30 % to 40 % of the surface water runoffs in Mexico (García & Kauffer, 2011; March-Mifsut & Castro, 2010). Furthermore, according to the National Institute of Ecology and Climate Change

En esta perspectiva, el presente estudio exploró y analizó los patrones de precipitaciones en las cuencas transfronterizas de Usumacinta y Grijalva desde un punto de vista natural, *i.e.*, implicando una delineación natural e hidrográfica de estos cuerpos de agua incluyendo Guatemala y Belice. Por lo tanto, puesto que el lado mexicano es una cuenca receptora, el presente estudio buscó entender los patrones de precipitaciones en estas cuencas, que son representadas por una unidad natural. Así, el estudio tuvo el propósito de mejorar el conocimiento y de promover la resiliencia del clima en la región. Sobre esta base, concluimos que nuestro enfoque puede promover no sólo la investigación sobre el tema, recalando la generación de conocimiento para las cuencas bajo varios contextos, sino también la toma de decisiones relacionada con los retos de gestión del recurso hídrico en el área de estudio.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de la frontera sur de México comprende seis cuencas abarcando un área total de ~168,349 km² (cuencas Usumacinta, Grijalva, Candelaria, Hondo, Suchiate y Coatán), las cuales se extienden a través de México, Guatemala y Belice. En particular, las cuencas Grijalva y Usumacinta (a las cuales se les denomina cuenca completa en adelante), por su importancia, extensión y desarrollo hidrológico, tienen un alto capital natural. El área de la cuenca de Usumacinta (72,118 km²) está dividida entre México (42 %) y Guatemala (58 %), con una proporción menor en Belice (0.0002 %). Del área de la cuenca de Grijalva (57,682 km²), se estima que el 90.5 % se encuentra en México y el 9.5 % en Guatemala. En México, las cuencas Grijalva y Usumacinta tienen un área total de 82,478 km², representando el 4.2 % del territorio continental del país. La distribución de las dos cuencas en México incluye los estados de Tabasco, Chiapas, y una pequeña parte de Campeche (Figura 1).

Las cuencas Grijalva y Usumacinta comprenden no solo una de las regiones con una enorme diversidad biológica y cultural, sino también las cabeceras de ríos importantes. Estos ríos incluyen Usumacinta, Grijalva, San Pedro y Lacatún. De hecho, el río Usumacinta tiene el mayor caudal en Mesoamérica, estimado a 1,700 m³/s (March-Mifsut & Castro, 2010). En efecto, el sistema hidrológico Grijalva-Usumacinta es responsable del 30 a 40 % de los escurrimientos superficiales de agua en México (García & Kauffer, 2011; March-Mifsut & Castro, 2010). Además, según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el 67 % de las especies viviendo

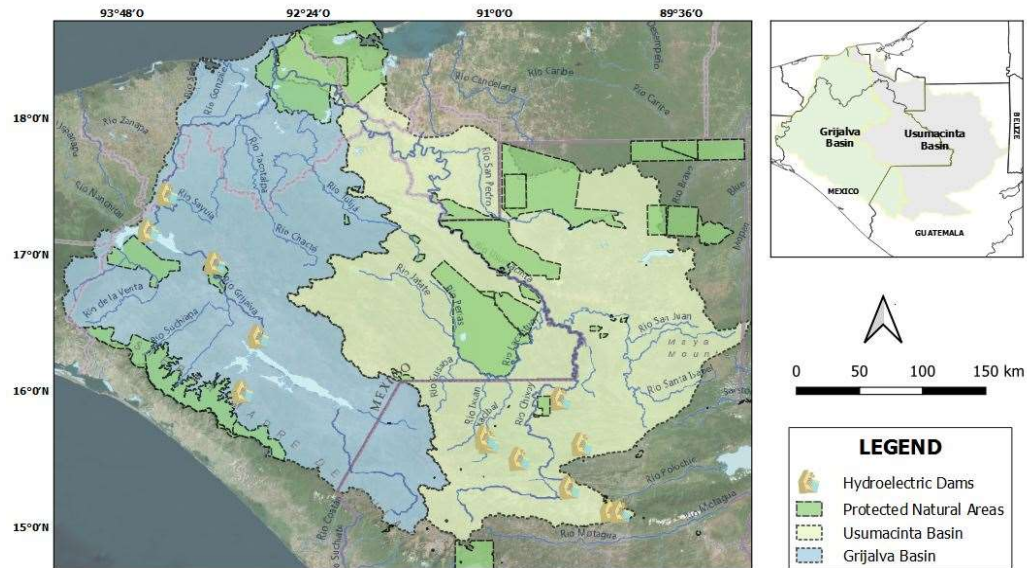


Figure 1. Location of the Grijalva and Usumacinta basins (QGIS Desktop 3.10.0, World Hydro Basemap: HydroTeamRC).

Figura 1. Ubicación de las cuencas Grijalva y Usumacinta (QGIS Desktop 3.10.0, World Hydro Basemap: HydroTeamRC).

(INECC, its Spanish acronym), 67 % of living species in the country are found in these basins. There include important protected areas such as the Pantanos de Centla Biosphere Reserve and the Lacan-Tun, El Triunfo and other protected natural areas. Coexisting activities are agriculture, cattle raising and hydroelectric generation. The Grijalva and Usumacinta basins embrace a total population of ~5 million.

en el país se encuentran en estas cuencas. Existen áreas naturales protegidas importantes, tales como la reserva de biosfera de Pantanos de Centla y El Lacan-Tun, El Triunfo y otras áreas naturales protegidas. Las actividades que coexisten en estas áreas son la agricultura, la ganadería y la generación de energía hidroeléctrica. Las cuencas Grijalva y Usumacinta abarcan una población total de ~5 millones.

Methods

The SPI was used to determine precipitation patterns in the Grijalva and Usumacinta basins. The main importance of this index was explained in the Introduction section. The Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) is known to be an index of coupled temperature and precipitation, it proposes determining the local factor but it only determinates the effect on the precipitation change. The SPI was used in the present study, since the SPEI showed a delay in drought occurrence (Castillo-Castillo *et al.*, 2017). This index was classified as shown in Table 1 and its use was suggested by the World Meteorological Organization (WMO) for drought studies (Mckee *et al.*,

Métodos

El SPI fue usado para determinar los patrones de precipitaciones en las cuencas Grijalva y Usumacinta. La principal importancia de este índice se aborda en la introducción. Se sabe que el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) es un índice de temperatura acoplado a precipitaciones, se propone determinar el factor local pero sólo determina el efecto sobre el cambio de precipitaciones. El SPI fue usado en este estudio puesto que el SPEI mostró un retraso en la incidencia de sequías (Castillo-Castillo *et al.*, 2017). Este índice está clasificado como se muestra en la Tabla 1 y sugerido por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) para los estudios

1993; WMO, 2012). Key sites in the basin (Figure 2) were selected according to their relative location to the important surface water mantles of the basin, *i.e.*, near the Grijalva and Usumacinta rivers or their tributaries. The SPI was calculated using the equation Pearson type III distribution (Guttman, 1999).

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

Where $a, b > 0$ for scale and shape parameters and $0 < c < x$ for location parameter, Γ is the gamma function.

sobre sequía (Mckee *et al.*, 1993; WMO, 2012). Los sitios claves de la cuenca (Figura 2) fueron seleccionados según la ubicación relativa a importantes mantos superficiales de agua de la cuenca, *i.e.*, cerca de los ríos Grijalva y Usumacinta o de sus afluentes. El SPI fue calculado usando la ecuación de distribución Pearson tipo III (Guttman, 1999).

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

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.

Table 1.
SPI classification system.

Tabla 1.
Sistema de clasificación del SPI.

SPI value*	Category
≥ 2.0	Extremely wet
1.5 to 1.99	Severely wet
1.0 to 1.49	Moderately wet
-0.99 to 0.99	Near normal
-1.0 to -1.49	Moderately dry
-1.5 to -1.99	Severely dry
≤ -2.0	Extremely dry

Source. WMO (2012).

Note. * SPI values < -1 indicate a condition of drought. The more negative the value is, the more severe the drought condition. SPI values > 1 indicate wetter conditions compared to the climatology.

Fuente. OMM (2012).

Nota. * Los valores de SPI < -1 indican una condición de sequía. Más negativo es el valor, más severa es la condición de sequía. Los valores de SPI > 1 indican condiciones más húmedas comparado con la climatología.

Data

Precipitation data were taken from the CRU TS4.01 database: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01, high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (January 1901–December 2016) (University of East Anglia Climatic Research Unit, Harris, & Jones, 2017). These data have a spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Thus, determination of the temporal evolution of the SPI from 1960 to 2016 at different timescales (3, 12 and 36 months) allowed us to identify wet

Datos

Los datos de precipitaciones fueron tomados de las bases de datos CRU TS 4.01: Unidad de Investigación Climatológica (CRU, por sus siglas en inglés) Series temporales (TS, por sus siglas en inglés) versión 4.01 datos en rejilla de alta resolución de variación climática mes a mes (enero 1901–diciembre 2016) (Unidad de Investigación Climatológica de la Universidad de East Anglia, Harris, & Jones, 2017). Estos datos tienen una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Por lo tanto, la determinación de la evolución temporal del SPI del

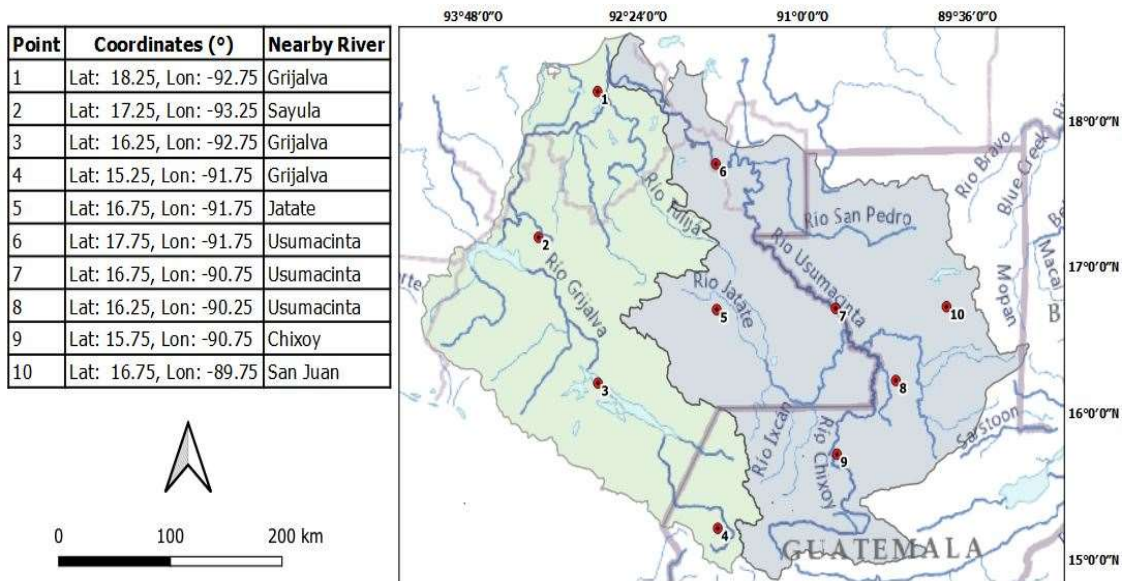


Figure 2. Location of key sites in the Grijalva and Usumacinta basins. (QGIS Desktop 3.10.0, World Hydro Basemap: HydroTeamRC).

Figura 2. Ubicación de los sitios claves en las cuencas Grijalva y Usumacinta. (QGIS Desktop 3.10.0, World Hydro Basemap: HydroTeamRC).

and dry periods on seasonal, annual and three-year bases near the rivers of the Grijalva and Usumacinta basins. In this region, degradation has been reported, associated with anthropogenic intervention in various areas (Gama *et al.*, 2010; Haer *et al.*, 2017).

Results and Discussion

Precipitation Climatology

Precipitation climatology of the Grijalva-Usumacinta basin was shown in Figure 3a. The high precipitation patterns were observed to be located in the upper basin, at the south border of Mexico, and at the northwest of the basin (Tabasco). The annual precipitation amount in these zones were ~2,500-2,880 mm from 1960 to 2016. While the low precipitation zones were located at the southwestern and northeastern areas of the basin (~1000 - 1800 mm). This result showed that the Usumacinta basin was wetter

1960 al 2016 a diferentes escalas de tiempo (3, 12 y 36 meses) permitió identificar periodos húmedos y secos sobre la base estacional, anual y trianual cerca de los ríos de las cuencas Grijalva y Usumacinta. En esta región, la degradación ha sido reportada, en asociación con una intervención antropogénica en varias áreas (Gama *et al.*, 2010; Haer *et al.*, 2017).

Resultados y Discusión

Climatología de la precipitación

La climatología de la precipitación de la cuenca Grijalva-Usumacinta se presenta en la Figura 3a. Se observa que los patrones de altas precipitaciones fueron ubicados en la parte superior de la cuenca, a la frontera sur de México, y al noroeste de la cuenca (Tabasco). La cantidad anual de precipitaciones en estas zonas es de ~2,500 a 2,880 mm entre 1960 y 2016. Mientras que las zonas de bajas precipitaciones están ubicadas al suroeste y al noreste de la cuenca (~1000 a 1800 mm). Este resultado mostró que la cuenca Usumacinta era más húmeda

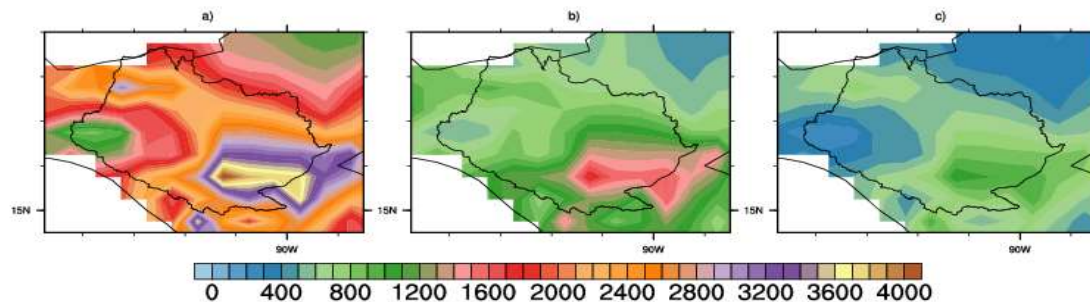


Figure 3. Precipitation climatology in the Grijalva and Usumacinta basins from 1960 to 2016: a) annual, b) summer and c) winter.

The high precipitation was located in the upper basin and at the northwest and the low precipitation was located in inverse directions.

Note. The polygonal zone corresponds to the delimitation of the Usumacinta and Grijalva basins and the units were expressed in mm.

Figura 3. Climatología de la precipitación en las cuencas Grijalva y Usumacinta entre 1960 y 2016: a) anual; b) veraniego; y, c) invernal.

Las altas precipitaciones fueron ubicadas en la parte alta de la cuenca y al noroeste y las bajas precipitaciones en direcciones inversas.

Nota. La zona poligonal corresponde a la delimitación de las cuencas Usumacinta y Grijalva y las unidades están expresadas en mm.

than the Grijalva basin. However, seasonal differences were observed along the year, Figures 3b and 3c showed the precipitation climatology during summer and winter, respectively. The patterns remained similar during winter with a similar precipitation amount due to cold fronts, while they differed in summer. The upper basin presented the higher precipitation amount than in the rest of the basin. During summer, this precipitation was due to tropical systems as Cyclons or Intertropical Convergence Zone (ITCZ).

SPI Patterns

Figure 4 and figure 5 showed the three SPI time windows. At all points, values of SPI-3 (seasonal window) were +2 to -2, *i.e.*, quarterly periods from 1960 to 2016 were from severely wet to severely dry. The precipitation behaviour was very similar at all points. However, in the Usumacinta region, there were extremely dry events around 1998; in the Grijalva region they occurred in 1960, 1970, 1980, 2003 and 2005.

For the annual SPI (SPI-12), the evolution at each point varied. This behaviour was not identified by the SPI-3 at none of the points. The SPI-12 values from 1960 to 2016

que la cuenca Grijalva. No obstante, a lo largo del año, hubo diferencias estacionales; las Figuras 3b y 3c mostraron la climatología de la precipitación en verano e invierno, respectivamente. Los patrones quedaron similares durante el invierno con una cantidad similar de precipitaciones, debido a los frentes fríos, mientras difirieron en verano. La parte de alta de la cuenca presentó la cantidad más alta de las precipitaciones que en el resto de la cuenca. Durante verano, estas precipitaciones se deben a los sistemas tropicales como los ciclones o la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en ingles).

Patrones del SPI

La Figura 4 y 5 muestra las tres ventanas de tiempo del SPI. En todos los puntos, los valores del SPI-3 (ventana estacional) fueron de +2 a -2, *i.e.*, los periodos trimestrales de 1960 a 2016 fueron de muy húmedos a severamente secos. El comportamiento de las precipitaciones fue muy similar en todos los puntos. No obstante, en la región de Usumacinta, hubo eventos extremadamente secos cerca de 1998; en la región de Grijalva, ocurrieron en 1960, 1970, 1980, 2003 y 2005.

Para el SPI anual (SPI-12), la evolución varió en cada punto. Este comportamiento no fue identificado por el SPI-3 en los puntos. Los valores del SPI-12 de 1960 a 2016 mostraron que

showed that precipitation behaviour was not homogeneous at all points. There were some exceptions, as for 1998, for which all points showed an extremely dry period. This was not evidenced by the SPI-3. Extremely wet events were more frequent after 2010 in all cases. In the Grijalva basin, the precipitation behaviour was similar at points 1 and 2, and at point 6 in the Usumacinta basin. In agreement with SEMARNAT (2016), the regional transformation was strong or very strong because of human influence. The precipitation evolution was similar at points 4, 5, 8 and 9 (all in the Usumacinta basin except point 4). This could be due to the fact that at these points, the land was covered with vegetation of a tropical rainforest. The SPI-12 variation was not similar between the remaining points (3, 7 and 10). Points 1, 2 and 3 differed from the rest of the points, showing a drier period from 1975 to 1995, while the other points indicated a wet period. At that time, the Pacific Decadal Oscillation (PDO) phase was negative and the La Niña events occurred. This result indicated that the different response to the climate modulator at each point could suggest a local influence of other factors, such as environmental factors.

For the three-year window SPI-36, precipitation pattern behaviour was very similar to the one of the SPI-12, but better defined. In the north of the entire basin, there was a dry period from 1978 to 1998. In the central basin, this dry period occurred as well, but also a maximum, *i.e.*, a wet period, between 1980 and 1990. At that time, the La Niña phase could have produced the wet event. There were other wet events after 2000, where the La Niña events could have been present and where the PDO phase was negative. Eastern areas of point 10, showed that the dry period began in 1962, *i.e.* it was longer; in this case the El Niño South Oscillation (ENSO) phase tended to warm. In the southern basin, the precipitation evolution was nearly identical to the central area, but the dry period was from 1970 to 2000 and wet events occurred after 2005. In addition, more extremely wet events were evidenced at points 1, 2 and 3 (Grijalva, Figure 4), and at points 5 and 6 (Usumacinta, Figure 5); at least one of these events was evidenced at all points (during the year 2000).

In particular, the present SPI-3 results showed that wet and dry events were similar across the Grijalva and Usumacinta basins. But the SPI-3 in the Grijalva basin showed more frequency of dry periods than in the Usumacinta basin, this result was comparable with the precipitation climatology,

el comportamiento de las precipitaciones no fue homogéneo a todos los puntos. Hubo algunas excepciones, como para 1998, cuando todos los puntos mostraron un periodo extremadamente seco. No fue claramente evidenciado por el SPI-3. Los eventos extremadamente húmedos fueron más frecuentes después de 2010 en todos los casos. En la cuenca de Grijalva, el comportamiento de las precipitaciones fue similar en los puntos 1 y 2, y en el punto 6 en la cuenca de Usumacinta. De acuerdo con la SEMARNAT (2016), la transformación regional por la influencia humana fue fuerte o muy fuerte. La evolución de las precipitaciones fue similar en los puntos 4, 5, 8 y 9 (todos en la cuenca de Usumacinta menos el punto 4). Esto podría ser debido a que, en estos puntos, el suelo está cubierto de vegetación de una selva tropical. La variación del SPI-12 no fue similar entre los puntos restantes (3, 7 y 10). Los puntos 1, 2 y 3 difirieron de los demás, mostrando un periodo más seco de 1975 a 1995, mientras que los otros puntos indicaron un periodo húmedo. A estas fechas, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) fue negativa y los eventos de La Niña ocurrieron. Este resultado mostró una respuesta diferente al modulador de clima para cada punto, lo que podría sugerir la influencia local de otros factores, como factores ambientales.

Para la ventana trianual del SPI-36, el comportamiento de las precipitaciones fue muy similar al del SPI-12, pero mejor definido. En el norte de la cuenca completa, hubo un periodo seco de 1978 a 1998. En la cuenca central, hubo también este periodo seco, pero igualmente un máximo, *i.e.*, un periodo húmedo entre 1980 y 1990. A estas fechas la fase de La Niña pudo haber producido el evento húmedo. Hubo otros eventos húmedos después del 2000, donde los eventos de La Niña pudieron haber estado presentes y la fase del PDO negativa. Las áreas localizadas al este del punto 10, mostraron que el periodo seco inició en 1962, *i.e.* duro más tiempo, en este caso la fase de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) estuvo tendiendo a cálida. En la cuenca sur, la evolución de las precipitaciones fue casi idéntica al del área central, pero el periodo seco fue de 1979 a 2000. Los eventos húmedos ocurrieron después de 2005. Además, eventos más extremadamente húmedos fueron evidenciados en los puntos 1, 2 y 3 (Grijalva, Figura 4), y en los puntos 5 y 6 (Usumacinta, Figura 5); al menos uno de estos eventos fue evidenciado en todos los puntos (durante el año 2000).

En particular, los resultados del SPI-3 del presente estudio mostraron que los eventos húmedos y secos fueron similares a lo largo de la cuenca de Grijalva y Usumacinta. Pero el SPI-3 de la cuenca de Grijalva mostró más frecuencia de periodos secos que el SPI-3 de la cuenca de Usumacinta, este resultado fue comparable con la climatología de la precipitación, donde la cuenca de Grijalva mostró la

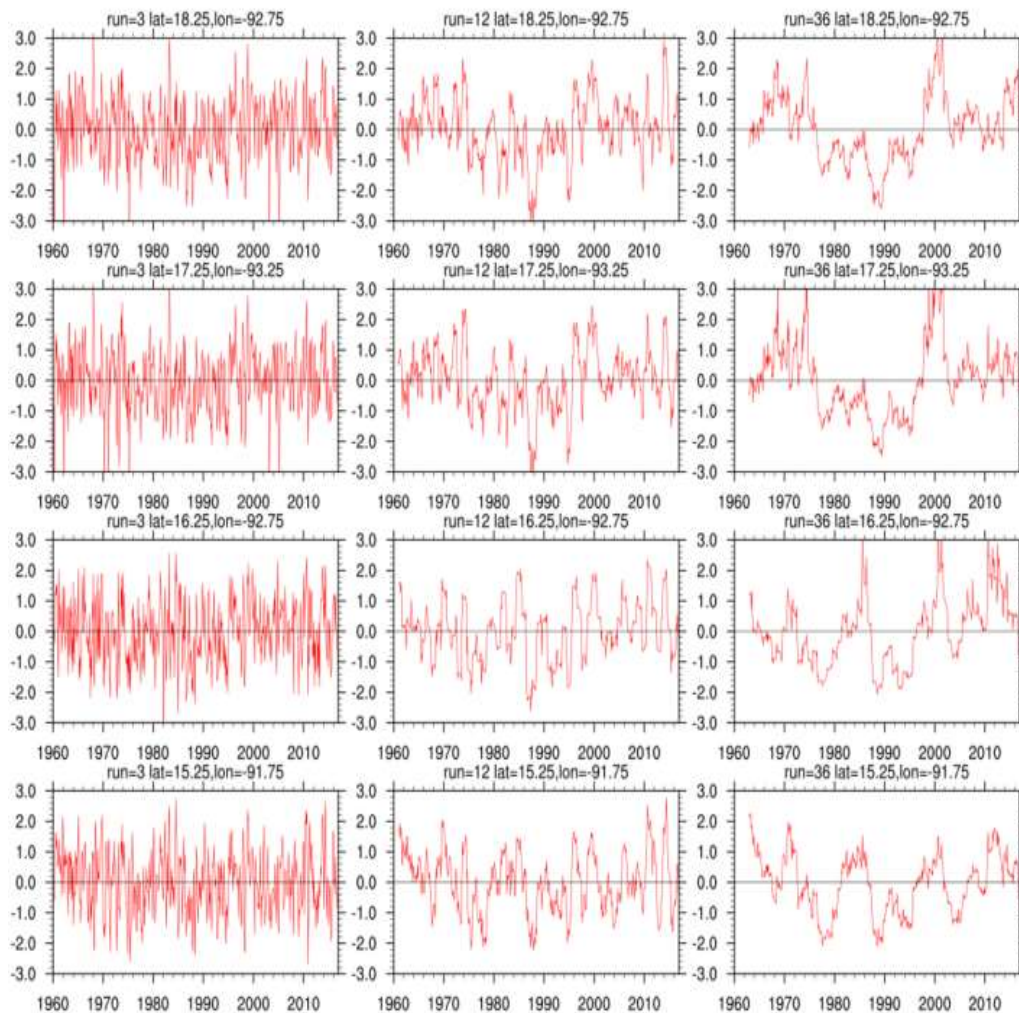


Figure 4. SPI (at 3, 12, and 36 months) from 1960 to 2016 for the Grijalva (red) basin.

The first column corresponds to the SPI-3, the second one to the SPI-12 and the third one to the SPI-36. Note. The order is following coordinates of the Figure 2.

Figura 4. SPI (3, 12 y 36 meses) de 1960 a 2016 para la cuenca Grijalva (rojo).

La primera columna corresponde al SPI-3, la segunda al SPI-12, y la tercera al SPI-36. Nota. El orden sigue las coordenadas de la Figura 2.

where the Grijalva basin showed the lower annual, summer and winter precipitation amount from 1960 to 2016. As well, the SPI-3 results presented a high precipitation amount at the points in the Usumacinta basin (Chiapas and Tabasco) and for some ones in the Grijalva basin (Tabasco).

However, the SPIs with larger windows (e.g., SPI-12) presented notable differences (Figure 4 and 5). Precipitation characteristics for the SPI-12 showed values around

cantidad más baja de precipitaciones anuales, veraniegas e invernales entre 1960 y 2016. Asimismo, los resultados del SPI-3 mostraron una alta cantidad de precipitaciones para los puntos de la cuenca de Usumacinta (Chiapas y Tabasco) y para algunos en la cuenca Grijalva, en Tabasco.

No obstante, los SPIs con ventanas más amplias (e.g. SPI-12) tuvieron diferencias notables (Figuras 4 y 5). Las características de las precipitaciones para el SPI-12

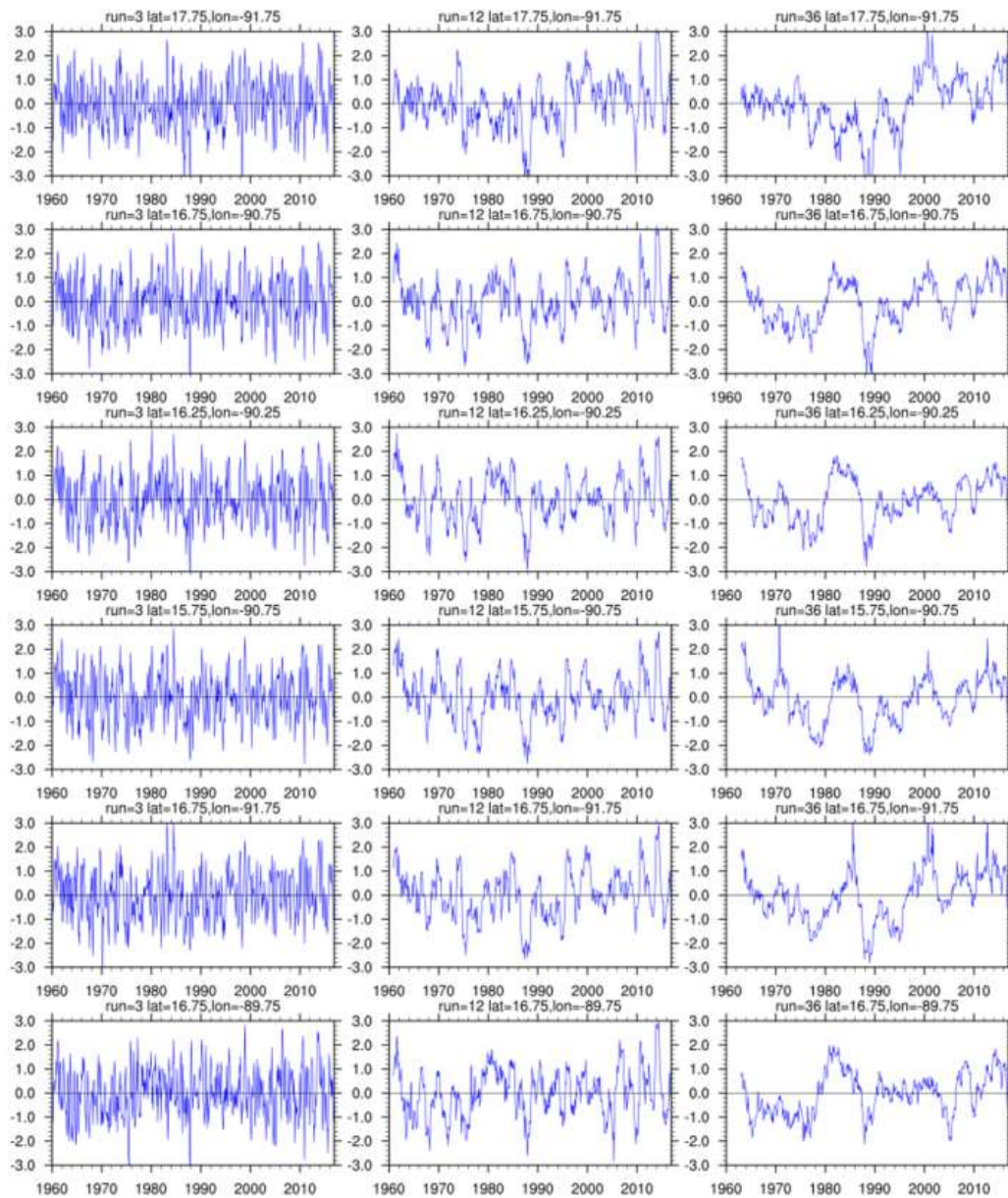


Figure 5. SPI (at 3, 12, and 36 months) from 1960 to 2016 for the Usumacinta (blue) basin.
The first column corresponds to the SPI-3, the second one to the SPI-12 and the third one to the SPI-36.
Note. The order is following coordinates of the Figure 2.

Figura 5. SPI (3, 12 y 36 meses) de 1960 a 2016 para la cuenca de Usumacinta (azul).
La primera columna corresponde al SPI-3, la segunda al SPI-12 y la tercera al SPI-36.
Nota. El orden sigue las coordenadas de la Figura 2.

zero at the points in the Usumacinta basin, whereas the points in the Grijalva basin showed periods with negative values, indicating a long dry period. These processes were described below.

Santana *et al.* (2017) reported extremely dry and wet events using the SPI-12 from 1985 to 2008 for the Usumacinta basin (Mexican portion only). These results concurred with the results obtained in this study, with extremely dry and wet events in the same period. These events could be related to the ENSO phases, this will be discussed further in the present paper. The severely dry, moderate dry, and wet events occurred from 1961 to 1985, in agreement with Santana *et al.* (2017) as well.

The SPI-36 revealed that precipitation varied geographically. Precipitation in the northern part of the entire basin had a similar behaviour. In the central basin area, the points showed the same precipitation evolution, and at the points located in the southern region, the SPI-36 revealed a parallel evolution as well. The precipitation analyses of González-Villela & Montero-Martínez (2017) showed this pattern only for the Usumacinta basin. The dry period at all points from 1970 to 2000 was associated with climate effects of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and with a weak phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) (Méndez & Magaña, 2010).

Figure 6 showed the SPI-12 vs. the PDO in the same period and their relationship. Most of the wet events occurred when the PDO was in its negative phase, and the dry events occurred when it was in its positive phase. This finding showed that the relationship was inverse. Méndez-González *et al.* (2011) showed that precipitation in southern Mexico was influenced by this oscillation and revealed the same regional precipitation behaviour as in our study. Méndez & Magaña (2010) argued that precipitation evolution all over Mexico was modulated by a combination of the ENSO with the PDO and the AMO, indicating a geographic dipole of the precipitation. That is, when the north is dry, the south is wet, and *vice versa*. Thus, these climate phenomena mainly altered regional precipitation. On the other hand, rainfall trends in southern Mexico and Central America were positive or negative during the 1990s (Dore, 2005; Jauregui, 1997), but different areas experiencing severe drought or wet spells were closely related to the shift in the ENSO towards warmer events since the late 1970s (Dore, 2005). The ENSO's phases determined the meteorological systems behaviour, as trade winds, cyclones and north

mostraron valores cerca de cero para los puntos de la cuenca de Usumacinta, mientras que los puntos de la cuenca de Grijalva mostraron periodos con valores negativos, indicando un largo periodo seco. Estos procesos están descritos debajo.

Santana *et al.* (2017) reportaron eventos extremadamente secos y húmedos usando el SPI-12 de 1985 a 2008 para la cuenca de Usumacinta (solo para la parte en México). Estos resultados coincidieron con los obtenidos en este estudio, con eventos extremadamente secos y húmedos para el mismo periodo. Estos eventos pudieran ser relacionados con las fases del ENSO, este punto será discutido más adelante. Los eventos severamente secos, moderadamente secos y húmedos ocurrieron de 1961 a 1985, igualmente de acuerdo con Santana *et al.* (2017).

El SPI-36 reveló que las precipitaciones variaron geográficamente. Las precipitaciones en la parte norte de la cuenca completa tuvieron un comportamiento similar. En el área central de la cuenca, los puntos mostraron la misma evolución de las precipitaciones, y en los puntos de la región sur, el SPI-36 reveló de nuevo una evolución paralela. Los análisis de precipitaciones de González-Villela & Montero-Martínez (2017) mostraron este perfil sólo para la cuenca de Usumacinta. El periodo seco para todos los puntos de 1970 a 2000 estuvo asociado a los efectos climáticos de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y a una fase débil de la Oscilación Multidecadal Atlántica (AMO) (Méndez & Magaña, 2010).

La Figura 6 mostró el SPI-12 vs. el PDO durante el mismo periodo y su relación. La mayoría de los eventos húmedos ocurrieron cuando el PDO estuvo en su fase negativa, y los eventos secos cuando estuvo en su fase positiva. Este resultado demostró que la relación entre el SPI-12 y el PDO es inversa. Méndez-González *et al.* (2011) mostraron que las precipitaciones en el sur de México están influenciadas por esta oscilación y revelaron el mismo comportamiento de las precipitaciones regionales que en nuestro estudio. Méndez & Magaña (2010) argumentaron que la evolución de las precipitaciones en todo México está modulada por la combinación del ENSO con el PDO y el AMO, indicando un dipolo geográfico de las precipitaciones. Es decir, cuando el norte es seco, el sur está húmedo, y viceversa. Por lo tanto, estos fenómenos climáticos alteran principalmente las precipitaciones regionales. Por otro lado, las tendencias de lluvias en el sur de México y de América Central fueron positivas o negativas durante los años 90s (Dore, 2005; Jauregui, 1997), pero las diferentes áreas experimentando sequías severas o periodos húmedos fueron estrechamente relacionadas con el cambio del ENSO hacia eventos más cálidos desde el final de los años 70s (Dore, 2005). Las fases del ENSO determinan el comportamiento de los sistemas meteorológicos, como los vientos alisios, los ciclones y los vientos del norte en la

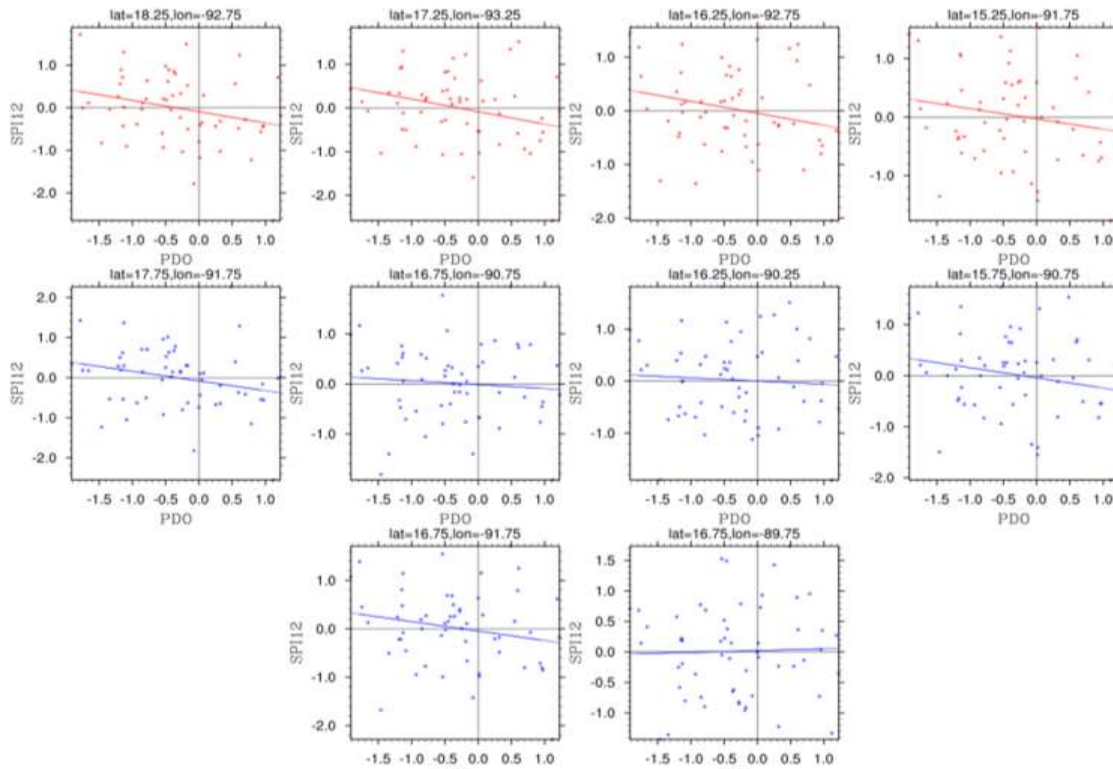


Figure 6. Relationships between the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and the Standardized Precipitation Index at 12 months (SPI-12) at each study point from 1960 to 2016.

The red points represented the Grijalva basin and the blue ones the Usumacinta basin.

Figura 6. Relaciones entre la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el Índice Estandarizado de Precipitaciones a 12 meses (SPI-12) en cada punto de estudio de 1960 a 2016.

Los puntos rojos representan la cuenca Grijalva y los azules la cuenca Usumacinta.

winds in the Grijalva-Usumacinta basin. The decrease in cyclones number and the increase in north winds drove to dry periods (Andrade-Velázquez, 2017).

Figure 7 presented the relationship between the SPI-12 and the Oceanic Niño Index (ONI), one of the El Niño indexes. The trend shown confirmed that the ONI negative phase was associated with positive values of the SPI, *i.e.*, wet events, while the ONI positive phase was associated with dry events in south-eastern Mexico. In this line of research, using local data, Arreguín *et al.* (2014) reported that during the La Niña event (ENSO cold or negative phase) in 2007, there were intense rainfall events in the southeast of the country. As well, other studies indicated that extreme

cuena de Grijalva-Usumacinta. La disminución del número de ciclones y el aumento de los vientos del norte llevó a periodos secos (Andrade-Velázquez, 2017).

La Figura 7 presentó la relación entre el SPI-12 y el Índice Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en inglés), uno de los índices del evento El Niño. La tendencia mostrada confirmó que la fase negativa del ONI fue asociada a valores positivos del SPI, *i.e.*, eventos húmedos, mientras que la fase positiva del ONI fue asociada a eventos secos en el sureste de México. En esta misma línea de investigación, usando datos locales, Arreguín *et al.* (2014) reportaron que durante el evento La Niña (fases frías o negativas del ENSO) de 2007, hubo eventos intensos de lluvias en el sureste del país. Asimismo, otros

rainfall events were linked to the La Niña events (Peralta-Hernández *et al.*, 2009; Pérez-Morga *et al.*, 2013).

A wet period has been observed at all points since 2009. The IPCC (2013, 2014) reported changes in precipitation data using annual anomalies from 1900 to 2010, but it did not mention any trend in the tropics during that period. Over the last 10 years, precipitation events in south-eastern Mexico have been in line with negative phases of the PDO and the ENSO. Mateos *et al.* (2015) reported that the PDO signal could be possibly present for other regions in the country, in the present work a

estudios indicaron que eventos extremos de lluvias fueron asociados a el evento La Niña (Peralta-Hernández *et al.*, 2009; Pérez-Morga *et al.*, 2013).

Se ha presentado un periodo húmedo en todos los puntos desde 2009. El IPCC (2013, 2014) reportó cambios en los datos de precipitaciones usando anomalías anuales de 1900 a 2010, pero no mencionó ninguna tendencia en los trópicos durante este periodo. Durante los últimos 10 años, los eventos de precipitación en el sureste de México estuvieron en línea con fases negativas del PDO y del ENSO. Mateos *et al.* (2015) reportaron que la señal del PDO pudiera posiblemente estar presente para otras

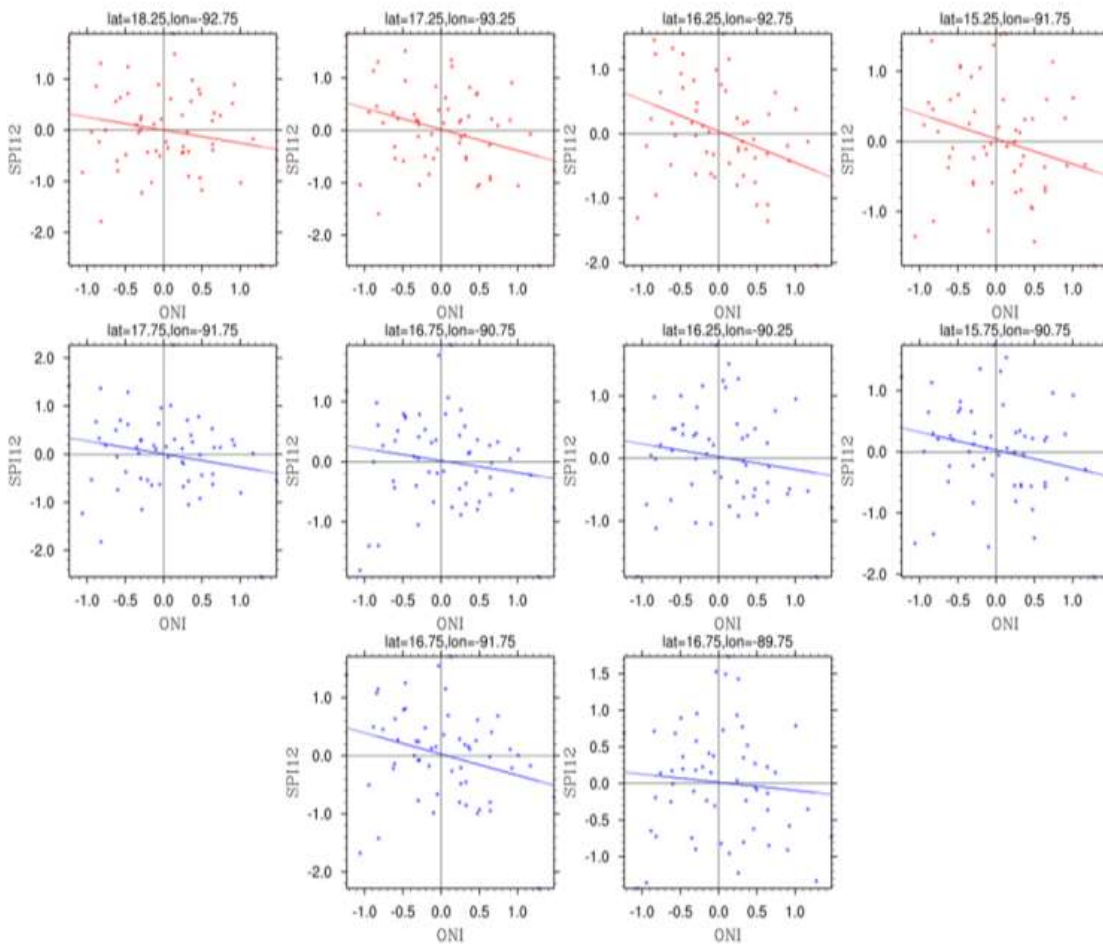


Figure 7. Relationships between the Oceanic Niño Index (ONI) and the Standardized Precipitation Index at 12 months (SPI-12) at each study point from 1960 to 2016.

The red points represented the Grijalva basin and the blue ones the Usumacinta basin.

Figura 7. Relaciones entre el Índice Niño Oceánico (ONI) y el Índice Estandarizado de Precipitaciones a 12 meses (SPI-12) en cada punto de estudio de 1960 a 2016.

Los puntos rojos representan la cuenca Grijalva y los azules la cuenca Usumacinta.

relationship between the PDO and the SPI-12 was demonstrated for southern Mexico. However, Mateos *et al.* (2015) found that the precipitation pattern did not show a homogeneous behaviour in several watersheds. Montero-Martínez *et al.* (2018) showed that from 1965 to 1994, the Usumacinta basin exhibited dry events, which could be associated to the microclimates of complex topographical areas or to changes in the land-use and land-cover.

Guevera-Murua *et al.* (2018) reported a similar influence of the ENSO in Guatemala, cold phases were related to wet periods and warm phases were related to dry periods. Figure 7 showed that the relationship between the ENSO and the SPI-12 was inverse for the basin, however it also showed that there could be some others events involved in this relationship (Muñoz-Jiménez *et al.*, 2019). This behaviour could be associated to the seasonal ENSO-PDO relation and to its influence on the Mexican climate; a PDO-ENSO constructive interference was identified (Pavia *et al.*, 2006).

Table 2 showed the correlation of statistical parameters for each point between the ONI and the SPI-12 and between the PDO and the SPI-12. The coefficient of correlation was low, but a significant relationship was detected for the Grijalva basin. In the case of the Usumacinta basin, other factors could be involved, which will be discussed later. In spite of the high spread in the values between the indexes and the SPI-12, a correlation, although low in some cases, could be found between them, confirming the results obtained in previous studies which showed an association of the PDO and of the ENSO with precipitation patterns (Méndez & Magaña 2010).

Nowadays, climate change is recognized as a great challenge by the United Nations. Precipitation is a crucial element in spatiotemporal variability of the water balance (Mujere & Eslamian, 2014). Thus, analysing and understanding precipitation patterns at the basin level is necessary for the management of water resources under the climate natural variability. Although climate change is known as the main stressor on the climate, the grade of its relationship with global modulators, such as the ENSO, has not been determined yet (Maloney *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2017). Projections of climate change could define this relationship.

regiones del país, en el presente trabajo, una relación entre el PDO y el SPI-12 fue demostrada para el sur de México. No obstante, Mateos *et al.* (2015) encontraron que el patrón de precipitaciones no mostró un comportamiento homogéneo en varias cuencas hidrográficas. Montero-Martínez *et al.* (2018) demostraron que de 1965 a 1994, la cuenca de Usumacinta mostró eventos secos, lo cual podría estar asociado a microclimas de áreas topográficas complejas o a cambios en el uso del suelo y de la cobertura del suelo.

Guevera-Murua *et al.* (2018) reportaron una influencia similar del ENSO en Guatemala, las fases frías estuvieron relacionadas con periodos húmedos y las fases cálidas estuvieron relacionadas con periodos secos. La Figura 7 mostró que la relación entre el ENSO y el SPI-12 fue inversa para la cuenca, no obstante, también mostró que podría haber otros eventos adicionales implicados en esta relación (Muñoz-Jiménez *et al.*, 2019). Este comportamiento podría ser asociado a la relación estacional ENSO/PDO y a su influencia con el clima mexicano; una interferencia constructiva entre el PDO y el ENSO fue identificada (Pavia *et al.*, 2006).

La Tabla 2 mostró las correlaciones de los parámetros estadísticos entre el ONI y el SPI-12 y entre el PDO y el SPI-12 para cada punto. El coeficiente de correlación fue bajo, pero una relación significativa fue detectada para la cuenca Grijalva. En el caso de la cuenca Usumacinta, otros factores pudieron estar involucrados, lo que será discutido más adelante. A pesar de la alta dispersión de los valores entre los índices y el SPI-12, una correlación, aunque baja, pudo ser evidenciada entre ellos, confirmando los resultados de estudios anteriores los cuales demostraron una asociación del PDO y del ENSO con los patrones de precipitaciones (Méndez & Magaña, 2010).

Hoy en día, el cambio climático se reconoce como un gran reto por las Naciones Unidas. Las precipitaciones representan un elemento crucial en la variabilidad espacio-temporal del balance hidrológico (Mujere & Eslamian, 2014). Por lo tanto, es necesario analizar y comprender los patrones de precipitaciones a nivel de la cuenca para la gestión de los recursos hídricos bajo la variabilidad climática natural. Aunque se conoce el cambio climático como el principal estresor sobre el clima, el grado de su relación con moduladores globales como el ENSO aún no ha sido determinado (Maloney *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2017). Las proyecciones del cambio climático podrían definir esta relación.

Table 2.
Adjustment of statistical parameters for the ONI and the PDO versus the SPI-12.

Tabla 2.
Correlación de los parámetros estadísticos entre el ONI y el SPI-12 y entre el PDO y el SPI-12.

Point	ONI adjustment		PDO adjustment	
	R ²	p_val	R ²	p_val
1	0.035	0.166	0.065	0.056
2	0.095	0.020	0.081	0.031
3	0.153	0.003	0.055	0.079
4	0.079	0.035	0.032	0.181
5	0.082	0.031	0.040	0.137
6	0.044	0.118	0.059	0.068
7	0.026	0.235	0.007	0.550
8	0.026	0.236	0.004	0.646
9	0.052	0.088	0.041	0.131
10	0.008	0.497	0.001	0.820

However, climate change is not the only pressure exerted on regional water resources. Other factors such as changes in land cover and land use could affect the hydrological cycle and the climate system as well (Oki *et al.*, 2013). Localized environmental destruction including extreme deforestation has occurred at both basin and state levels (Romo-López, 2008; Tudela, 1990; 2004). In the Mexican parts of the Grijalva and Usumacinta basins, the deforestation rates are higher than the Latin American mean of 0.33 %. Moreover, these rates are high compared to the national level of 0.51 % from 1976 to 2000 and 1.3 % from 1993 to 2000 (Kolb & Galicia-Sarmiento, 2011). Similarly, Cuevas *et al.* (2010) identified processes of land-use changes and of vegetation degradation between 1976 and 2009 in the region of the Grijalva and Usumacinta basins. In particular, in the state of Tabasco in south-eastern Mexico, tropical forest covered 49 % of its area in 1940. However, in 1987, this coverage was around 8 % (Tudela, 1990). Gallardo-Cruz *et al.* (2019) reported that land-use changes and vegetation degradation were intensive between 2000 and 2012 in the Usumacinta basin. In this sense, PNUD México-INECC (2018) reported that the factors that conditioned the vulnerability of water resources in this basin were related to high levels of loss and fragmentation of vegetation, changes in the hydrological dynamics of the basin, urbanization,

Sin embargo, el cambio climático no es la única presión que se ejerce sobre los recursos hídricos regionales. Existen otros factores como los cambios en cobertura y uso del suelo que podrían afectar el ciclo hidrológico y el sistema climático (Oki *et al.*, 2013). La destrucción ambiental localizada incluyendo la deforestación extrema ha ocurrido a ambos niveles de la cuenca y del país (Romo-López, 2008; Tudela, 1990; 2004). En las partes mexicanas de las cuencas de Grijalva y Usumacinta, las tasas de deforestación son más altas que la media de 0.33 % para Latino América. Además, estas tasas son altas comparadas al nivel nacional, de 0.51 % de 1976 a 2000 y de 1.3 % de 1993 a 2000 (Kolb & Galicia-Sarmiento, 2011). De manera similar, Cuevas *et al.* (2010) identificaron procesos de cambio de uso del suelo y de degradación de la vegetación entre 1976 y 2009 en la región de las cuencas Grijalva y Usumacinta. En particular, en el estado de Tabasco en el sureste de México, el bosque tropical cubría 49 % de su área en 1940. Sin embargo, en 1987, esta cobertura estaba cerca de 8 % (Tudela, 1990). Gallardo-Cruz *et al.* (2019) reportaron que el cambio en el uso de suelo y en la degradación de la vegetación fueron intensivos entre 2000 y 2012 en la cuenca Usumacinta. En este sentido, PNUD México-INECC (2018) reportaron que los factores que condicionaron la vulnerabilidad de los recursos hídricos en esta cuenca estaban relacionados con altos niveles de pérdida y fragmentación de la vegetación, con cambios en la dinámica hidrológica de la cuenca, urbanización, práctica de actividades agrícolas no sustentables, contaminación de aguas, pérdida de servicios del agua y de saneamiento, y con una gestión ineficiente de

unsustainable agricultural practices, water pollution, lack of water and sanitation services, and inefficient waste management. In Guatemala, a neighbouring country of Central America, deforestation rates are even greater. Here, the department of Petén, together with portions of the Usumacinta basin, are considered as deforestation hotspots (IARNA-URL, 2012; GIMBOT, 2014).

Thus, environmental degradation affected the entire study area. The effects of vegetation coverage degradation and regional deforestation appeared in the hydrological cycle as vegetation humidity loss, runoffs that amplified infiltrations loss, microclimate modification, increased land erosion, dynamic changes in sediments and water source leaching (Tudela, 2004). Additionally, according to IPCC (2019), land degradation processes can affect soil, water or biotic components of the land or their respective interfaces.

System dynamics of the Grijalva and Usumacinta rivers were affected by other activities, such as hydroelectric (Muñoz-Salinas & Castillo, 2015). Five multiuse dams have started to operate between 1964 and 1986 along the Grijalva River. These dams store nearly 40 % of the water and provide half of the hydroelectricity in Mexico. In contrast, there are no dams in the Mexican Usumacinta basin, versus a total of eight hydroelectric dams in the Guatemalan part of this basin, especially the one on the Chixoy river, which is an important tributary of the Usumacinta river in Mexico.

To confront the aforementioned challenges in south-eastern Mexico, where precipitation is heavy and the exposure to climate change and variability is high (García & Kauffer, 2011; Kauffer, 2006; Valdés-Manzanilla, 2016; 2018), studying and understanding relevant topics is essential. In this sense, studying rainfalls and its relationships with the PDO and the ENSO at this regional scale is very important to understand the regional climate, the variation of water flows and its control variables and causing factors, aiming to estimate the water availability and its impact on the economic activities. Accordingly, due to climate change risks for human and natural systems (Mora *et al.*, 2018; UN Environment, 2019), decision-makers in government and society should act jointly to strengthen mitigation and adaptation capacity at facing climate variability and other changes in the Grijalva and Usumacinta basins.

los residuos. En Guatemala, un país vecino en América Central, las tasas de deforestación son aún más altas. Allí, el departamento de Petén, junto con unas partes de la cuenca de Usumacinta se consideran como focos de deforestación (IARNA-URL, 2012; GIMBOT, 2014).

Por lo tanto, la degradación ambiental influyó sobre toda el área de estudio. Los efectos de la degradación de la cobertura vegetal y de la deforestación regional se manifestaron en el ciclo hidrológico, como la pérdida de humedad en la vegetación, los escurrimientos de agua aumentando la pérdida de infiltraciones, la modificación del microclima, el aumento de la erosión del suelo, los cambios dinámicos en los sedimentos y la lixiviación de fuentes de agua (Tudela, 2004). En adición, según IPCC (2019), los procesos de degradación del suelo pueden afectar los componentes del suelo, del agua o los componentes bióticos del suelo o sus interfaces respectivos.

Las dinámicas de los sistemas de los ríos Grijalva y Usumacinta fueron afectados por otras actividades, como la hidroeléctrica (Muñoz-Salinas & Castillo, 2015). A lo largo del río Grijalva, existen cinco presas multiuso que han iniciado su operación entre 1964 y 1986. Estas presas almacenan cerca del 40 % del agua y proporcionan la mitad de la hidroelectricidad en México. En contraste, no hay presas en la cuenca mexicana de Usumacinta, contra un total de ocho presas hidroeléctricas en la parte guatemalteca de la cuenca, en particular la que se encuentra en el río Chixoy, el cual es un importante afluente del río Usumacinta en México.

Para enfrentar los retos antes mencionados en el sureste de México, donde las precipitaciones son fuertes y la exposición al cambio y a la variabilidad climática es alta (García & Kauffer, 2011; Kauffer, 2006; Valdés-Manzanilla, 2016; 2018), es esencial estudiar y entender los temas relevantes. En este sentido, estudiar las lluvias y su relación con el PDO y el ENSO a esta escala regional es muy importante para entender el clima de la región, la variación de los flujos de agua y sus variables de control y factores causantes, con el objetivo de estimar la disponibilidad en agua y su impacto en las actividades económicas. Por consiguiente, debido a los riesgos del cambio climático sobre los sistemas humanos y naturales (Mora *et al.*, 2018; UN Environment, 2019), los tomadores de decisiones del gobierno y de la sociedad deberían actuar conjuntamente para reforzar la capacidad de mitigación y de adaptación al enfrentar la variabilidad climática y otros cambios en las cuencas de Grijalva y Usumacinta.

Conclusions

The present research provided information on the evolution of precipitation patterns in the Grijalva and Usumacinta basins over 57 years. Information obtained using the seasonal and annual windows of the SPI revealed extremely dry and wet periods in the study area. The PDO and the ENSO indicated an inverse relationship with the SPI-12 behaviour. This study was carried out until 2016 and a wet period was detected in the most recent decade. Further studies on possible scenarios of changes in precipitation patterns in the whole basin due to climate change are required. Although the study showed the results of an historical record under conditions of strong climate natural variability, the grade of impact of climate change on the ENSO was not cleared up yet. However, climate change effects on the ENSO could determine future precipitation patterns in the whole basin.

Finally, the Grijalva-Usumacinta water system has been subjected to various environmental degradation processes in the whole basin. Thus, climate change does not represent the only pressure on natural resources and water abundance in the area. Further studies are required on how global change impacts these basins. From this perspective, the present study furnished a baseline for a deeper understanding of these issues at the regional scale.

Acknowledgments

The authors thank the Centre for Global Change and Sustainability, A.C. (CCGS) for the facilities provided while conducting this research. In addition, they thank the anonymous reviewers for their comments and recommendations for improving this research. The authors also thank the Cátedras-CONACYT program and the Cátedra-CCGS project no. 945 "Vulnerability, socio-environmental and adaptation measures to climate change in southeast Mexico" and no. 963 "Towards a sustainable water management in southeast Mexico and adjacent areas of Central America".

References

Andrade-Velázquez, M. (2017). Visión climática de la precipitación en la cuenca del Río Usumacinta. En Denise Soares y Antonino García García (Coord.), *La cuenca del Río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático*

Conclusión

El presente estudio proporcionó informaciones sobre la evolución de los patrones de precipitación en las cuencas Grijalva y Usumacinta a lo largo de 57 años. La información obtenida usando las ventanas estacionales y anuales del SPI reveló periodos secos y húmedos en el área de estudio. El PDO y el ENSO indicaron una relación inversa con el comportamiento del SPI-12. Este estudio se llevó a cabo hasta el 2016 y detectó un periodo húmedo en la década más reciente. Se requieren más estudios acerca de posibles escenarios de cambios en los patrones de precipitaciones en la cuenca completa debido al cambio climático. Aunque el presente estudio mostró los resultados del registro histórico bajo condiciones de fuerte variabilidad climática natural, el grado de impacto del cambio climático sobre el ENSO no ha quedado claro aún. Sin embargo, los efectos del cambio climático sobre el ENSO podrían determinar los futuros patrones de precipitaciones en la cuenca completa.

Finalmente, el sistema de agua de Grijalva-Usumacinta ha sido sujeto a varios procesos de degradación ambiental en la cuenca completa. Por lo tanto, el cambio climático no representa la única presión sobre los recursos naturales y la abundancia en agua en el área. Se requieren más estudios sobre los impactos del cambio global sobre estas cuencas. En esta perspectiva, el presente estudio proporcionó una base para una comprensión más profunda de estos temas a escala regional.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro para el Cambio Global y la Sostenibilidad, A.C. (CCGS) por las instalaciones prestadas para realizar esta investigación. Además, agradecen a los revisores anónimos por sus comentarios y recomendaciones para mejorar este estudio. Los autores también agradecen al programa Cátedras-CONACYT y al proyecto Cátedra-CCGS no. 945 "Vulnerabilidad, medidas socio-ambientales y adaptativas al cambio climático en el suroeste de México" y no. 963 "Hacia una gestión sustentable del agua en el sureste de México y las áreas adyacentes de América Central".

- (pp. 57-75). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA): México. <https://www.gob.mx/imta/documentos/la-cuenca-del-rio-usumacinta-desde-la-perspectiva-del-cambio-climatico>
- Arreguín-Cortés, F. I., Rubio-Gutiérrez, H., Domínguez-Mora, R., and 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. <http://www.revistatyc.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/424>
- Comisión de Asuntos Fronterizos Sur [CAFS]. (2018). Programa de Trabajo. Tercer Año de Ejercicio, LXIII Legislatura, Senado de la Republica. Ciudad de México, México. http://www.senado.gob.mx/comisiones/asuntos_fronterizos_sur/programa.php
- Cruz-Paz, G., Castillo-Uzcanga, M., Espinoza-Tenorio, A., Bravo-Peña, L., Valencia-Barrera, E., and Mesa-Jurado, M. A. (2018) Áreas prioritarias de conservación en la Cuenca Usumacinta, la aplicación de un enfoque multicriterio. *Investigaciones Geográficas*, 0(97). <http://dx.doi.org/10.14350/ig.59482>
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, J. L., and González, D. I. (2010). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. In: Cotler, H., coord. *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización* (p: 96-103). Semarnat, INE y Fundación G. Río Arronte I.A.P. México, D.F. <https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-de-mexico-diagnostico-y-priorizacion/>
- Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know?. *Environment International*, 31 (8), 1167-1181 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>
- Duran-Encalada, J. A., Paucar-Caceres, A., Bandala, E. R., and Wright, G. H. (2017). The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region. *European Journal of Operational Research*, 256(2), 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.016>
- Duncan-Golicher, J., & Morales, J. (2005). Correlations between precipitation patterns in the state of Chiapas and the El Niño Sea surface temperature index. En Edith F. Kauffer (Ed.), *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT): México.
- 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*, Vol 133. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/133/21017>
- García, A. G., & Kauffer, E. F. M. (2011). Las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice: Un acercamiento a su delimitación y problemática general. *Frontera Norte* 23, (45). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13618448005>>
- Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra [GIMBOT]. (2014). Mapa de bosques y uso de la tierra 2012 y Mapa de cambios en uso de la tierra 2001- 2010 para estimación de emisiones de gases de efecto invernadero. Documento Informativo. http://www.sia.marn.gob.gt/publicaciones/otros/Documento%20informativo_GIMBOT_oct2014.pdf [Last Checked: November 02th 2019].
- Guevara-Murua, A., Williams, C. A., Hendy, E. J. and Imbach, P. (2018). 300 years of hydrological records and societal responses to droughts and floods on the Pacific coast of Central America. *Climate of the Past*, 14, 175–191. <https://doi.org/10.5194/cp-14-175-2018>
- González-Villela, R., & Montero-Martínez, M. J. (2017). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en el caudal del río Usumacinta, México. En Denise Soares y Antonino García García (Coord.), *La cuenca del Río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático* (pp. 149-180). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA): México. <https://www.gob.mx/imta/documentos/la-cuenca-del-rio-usumacinta-desde-la-perspectiva-del-cambio-climatico> [Last Checked: August 05th 2019].
- González, J. E., M. Georgescu, M. C. Lemos, N. Hosannah, and D. Niyogi. (2017). Climate change's pulse is in Central America and the Caribbean, *Eos*, 98. <https://doi.org/10.1029/2017EO071975>
- 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>
- Haer, T., Botzen, W., Zavala-Hidalgo, J., Cusell, C., and Ward, P. (2017). Economic evaluation of climate risk adaptation

- strategies: Cost-benefit analysis of flood protection in Tabasco, Mexico. *Atmósfera*, 30(2), 101-120. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.02.03>
- Jauregui, E. (1997). Climate changes in Mexico during the historical and instrumented periods. *Quaternary International*, 43/44:7 – 17. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(97\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(97)00015-3)
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. La cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta.. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/402/cuencas.html> [Last Checked: February 27th 2019].
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales, Ambiente [IARNA-URL]. (2012). Perfil Ambiental de Guatemala 2010- 2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo. Guatemala. Universidad Rafael Landívar. <https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/pPublicacion.aspx?pb=372>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2019). Climate change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl/> [Last Checked: December 05th 2019].
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2018). Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2013). Climate Change (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). Climate Change (2014) Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V. R., C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.
- Kauffer, E. (2006). El agua en la frontera sur de México: Una aproximación a la problemática de las cuencas compartidas con Guatemala y Belice. *Boletín del archivo histórico del agua*, no. 33, año 11, mayo-agosto, México, AHA/ CIESAS/CNA. <https://biblat.unam.mx/hevila/BoletinDelArchivohistoricodelagua/2006/vol11/no33/3.pdf>
- Kolb, M., & Galicia-Sarmiento, L. (2011). Patrones y procesos regionales de deforestación y regeneración en la cuenca Grijalva-Usumacinta. Primer Encuentro de Investigación en la Región Usumacinta. https://www.researchgate.net/publication/268513752_Patrones_y_procesos_regionales_de_deforestacion_y_regeneracion_en_la_cuenca_Grijalva-Usumacinta
- Landa, R.; Magaña, V., and Neri, C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2017/12/agua-y-clima.pdf>
- March-Mifsut, I., & Castro, M. (2010). La Cuenca del Río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. En H. Cotler Ávalos (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*, (pp. 193–197). México D.F.: SEMARNAT, INE, IAP. <https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-de-mexico-diagnostico-y-priorizacion>
- Magaña, V., Méndez, B., Neri, N., and Vázquez, G. (2018). El riesgo ante la sequía meteorológica en México. *Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, Vol 9, Núm 1, enero-abril 2018. ISSN 2007-2961. <https://biblat.unam.mx/es/revista/realidad-datos-y-espacio-revista-internacional-de-estadistica-y-geografia/2>
- Magaña, V.; Vázquez, J. L., Pérez, J. B., and Pérez, J. L. (2001). El fenómeno el niño/oscilación del sur (ENOS) y sus impactos en México. En Elva Escobar Briones, Marcial Bonilla, Antonio Badán, Margarita Caballero, y Alain Winckell (Compiladores), *Los efectos fenómeno El Niño en México 1997-1998* (pp. 17-24). México. <http://>

- horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-12/010065911.pdf
- Mateos, E., Santana, J.-S., Montero-Martínez, M. J., Deeb, A., and Grunwaldt, A. (2016). Possible climate change evidence in ten Mexican watersheds. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 91, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.08.009>
- Méndez-González, J., Ramírez-Leyva, A., Cornejo-Oviedo, E., Zárate-Lupercio, A., and Cavazos-Pérez, T. (2011). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas*, 0(73). <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n73/n73a5.pdf>
- 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>
- McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist. (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
- Misra, A. K. (2014). Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.04.006>
- Molina, M., Sarukhán, J., and Carabias, J. (2017). El cambio climático. Causas, efectos y soluciones. Colección La Ciencia Para Todos: FCE, SEP, CONACyT. 222 p. ISBN: 9786071643858, México.
- Montero-Martínez, M. J., Santana-Sepúlveda, J. S., Pérez-Ortiz, N. I., Pita-Díaz, Ó., and Castillo-Liñan, S. (2018). Comparing climate change indices between a northern (arid) and a southern (humid) basin in Mexico during the last decades. *Adv. Sci. Res.*, 15, 231-237. <https://doi.org/10.5194/asr-15-231-2018>
- Mora, C., Spirandelli, D., Franklin, E. C., Lynham, J., Kantar, M. B., Miles, W., Smith, C. Z., Freel, K., Moy, J., Louis, L. V., Barba, E. W., Bettinger, K., Frazier, A. G., Colburn IX, J. F., Hanasaki, N., Hawkins, E., Hirabayashi, Y., Knorr, W., Little, C. M., Emanuel, K., Sheffield, J., Patz, J. A., and Hunter, C. L. (2018). Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 8, pp. 1062–1071. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0315-6>
- Mujere, N. & Eslamian, S. (2014). Climate Change Impacts on Hydrology and Water Resources. In Eslamian, S. (Ed.), *Handbook of Engineering Hydrology* (113-126). Ch. 7, Vol. 2: Modeling, Climate Changes and Variability. Francis and Taylor, CRC Group, USA.
- Muñoz-Salinas, E. & Castillo, M. (2015). Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *CATENA*, 127, 270–278. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2015.01.007>
- Muñoz-Jiménez, R., Giraldo-Osorio, J. D., Brenes-Torres, A., Avendaño-Flores, I., Nauditt, A., Hidalgo-León, H. G.,...Birkel, C. (2019). Spatial and temporal patterns, trends and teleconnection of cumulative rainfall deficits across Central America. *International Journal of Climatology*, 39(4), 1940–1953. <https://doi.org/10.1002/joc.5925>
- Oki T., Blyth E.M., Berbery E.H., Alcaraz-Segura D. (2013). Land Use and Land Cover Changes and Their Impacts on Hydroclimate, Ecosystems and Society. In: Asrar G., Hurrell J. (eds). *Climate Science for Serving Society*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_7
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (2012). Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario. OMM-N 1090. ISBN 978-92-63-31090-3.
- Palomeque-De la Cruz, M. A., Galindo-Alcántara, A., Escalona-Maurice, M. J., Ruiz-Acosta, S. C., Sánchez-Martínez, A. J., and Pérez-Sánchez, E. (2017). Analysis of land use change in an urban ecosystem in the drainage area of the Grijalva River, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 105-120. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.03.018>
- Pavia, E.G., Graef, F., and Reyes, J.. (2006). PDO–ENSO Effects in the Climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19, 6433–6438. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI4045.1>
- Peralta-Hernández, A.R., Balling, R.C. Jr., and Barba-Martínez, L.R., (2009). Comparative analysis of indices of extreme rainfall events: Variations and trends from southern México. *Atmósfera*, 22(2), 219-228. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362009000200006&lng=es&tlng=en
- Pérez-Morga, N., Kretschmar, T., Cavazos, T., Smith, S. V., and Muñoz-Arriola, F. (2013). Variability of extreme precipitation

- in coastal river basins of the southern Mexican Pacific region. *Geofísica internacional*, 52(3), 277-291. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692013000300006&lng=es&tlng=en
- Prieto-González, R., Cortés-Hernández, V. E., and Montero-Martínez, M. J. (2011). Variability of the standardized precipitation index over México under the A2 climate change scenario. *Atmósfera*, 24(3), 243-249. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362011000300001&lng=es&tlng=en
- PNUD México-INECC. (2018). Vulnerabilidad actual y futura de los recursos hídricos ante el cambio climático en los estados del sureste de México, con enfoque en el desarrollo urbano sustentable. Proyecto 86487 "Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México". 206 pp. Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C., México.
- Romo-López, R. M. E. (2008). Hacia una historia ambiental de Tabasco. Ambiente y sociedad en Tabasco. *Anuario de Historia*, 2008, vol. III, p. 108-128. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).
- Santana, J. S., Montero-Martínez, M. J., and Mateos-Farfán, E. (2017). Meteorología para la creación y análisis de índices comparativos del índice normalizado de precipitación: cuenca del Río Usumacinta, un caso de estudio. En Denise Soares y Antonino García García (Coord.), *La cuenca del Río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático* (pp. 149-180). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA): México. <https://www.gob.mx/imta/documentos/la-cuenca-del-rio-usumacinta-desde-la-perspectiva-del-cambio-climatico> .
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 2016.
- Tudela, F. (1990). Recursos naturales y sociedad en el trópico húmedo tabasqueño. En: Leff, E. (Coord.) (1990) Medio ambiente y desarrollo en México. Vol. I. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades, UNAM; Ed. Porrúa. México. Pp.:149-227.
- Tudela, F. (2004). Los síndromes de sostenibilidad de desarrollo: El caso de México. Santiago de Chile: CEPAL.
- UN Environment (2019). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi. <https://doi.org/10.1017/9781108627146>
- University of East Anglia Climatic Research Unit; Harris, I.C.; Jones, P.D. (2017). CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2016). Centre for Environmental Data Analysis, 04 December 2017. <http://dx.doi.org/10.5285/58a8802721c94c66ae45c3baa4d814d0>
- 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>
- Valdés-Manzanilla, A. (2018). Effect of climatic oscillations on flood occurrence on Papaloapan River, México, during the 1550–2000 period. *Natural Hazards*, 94(1), 167–180. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3379-8>