

Análisis histórico de la precipitación en Felipe Carrillo Puerto

Historical analysis of precipitation in Felipe Carrillo Puerto

Vargas Magaña, M. F.¹ , Andrade-Velázquez, M.^{2*} 

¹ División de Ciencias Básicas – Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez Kilómetro 1, La Esmeralda, 86690, Cunduacán, Tabasco, México.

² CONAHCYT – Centro del cambio Global y la Sustentabilidad. Centenario Instituto Juárez S/N, Reforma, 86080, Villahermosa, Tabasco, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Vargas Magaña, M. F., Andrade Velázquez, M. (2024). Historical analysis of precipitation in Felipe Carrillo Puerto. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1560. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1560>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: September 28th 2023.

Accepted/Aceptado: January 02th 2024.

Available on line/Publicado: January 19th 2024.

RESUMEN

El presente trabajo versa en un análisis de la precipitación histórica en el periodo de 1972-2012 de las estaciones FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO, X-PICHIL - QROO y SEÑOR - QROO del Servicio Meteorológico Nacional en el Estado de Quintana Roo para determinar los eventos secos y húmedos del poblado Felipe Carrillo Puerto. Se definieron áreas de polígonos circundantes a las estaciones mediante diagramas de Voronoi y se calculó el índice estandarizado de precipitación (SPI) para la precipitación reportada por cada estación. Se encontró que hay cambios de los patrones de precipitación entre las estaciones que pueden responder a factores geográficos de la zona. Se propuso el cálculo del SPI mediante un factor areal en la zona de estudio. Los resultados muestran que el factor areal no cambia los eventos húmedos y secos de la zona, lo cual nos permite contar con una distribución de la precipitación en el área cercana a la estación. Los patrones de precipitación muestran para la zona de estudio mayores eventos secos para los últimos años del registro, es decir eventos de sequía en la zona.

PALABRAS CLAVE: Precipitación, SPI, Diagramas de Voronoi, Quintana Roo.

*Corresponding Author:

Mercedes Andrade-Velázquez. CONAHCYT-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad. Calle Centenario del Instituto Juárez S/N. Col. Reforma. C.P 86080, Villahermosa, Tabasco, México. Teléfono 99 33 15 06 12. E-mail: mercedes.andrade@ccgs.mx

ABSTRACT

The present work deals with an analysis of the historical precipitation in the period 1972-2012 of the stations FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) - QROO, X-PICHIL - QROO, and SEÑOR - QROO of the National Meteorological Service in the State of Quintana Roo to determine the dry and wet events of Felipe Carrillo Puerto town. Polygon areas surrounding the stations were defined using Voronoi diagrams and the standardized precipitation index (SPI) was calculated for the precipitation reported by each station. It was found that there are precipitation patterns changes between stations that may respond to the geographic factors of the area. It was proposed to calculate the SPI using an areal factor in the study area. The results show that the areal factor does not change the wet and dry events in the area, which allows us to have a distribution of precipitation in the area near the station. The precipitation patterns show for the study area greater dry events for the last years of the record, i.e. drought events in the area.

KEY WORDS : Precipitation, SPI, Voronoi diagrams, Quintana Roo.

Introducción

En el territorio mexicano los diversos fenómenos (Huracanes, tormentas severas, sequías extremas, incendios, sismos, volcanes) y la posición geográfica son factores que influyen en la diversidad de sus climas y ecosistemas (Gil *et al.*, 2018). En México, las precipitaciones en la mayoría de las regiones comienzan en mayo y por lo normal, se extienden hasta octubre. Siendo el mes de septiembre el más lluvioso en todo el país. Esto se debe a la influencia de los sistemas tropicales que ocurren, como las tormentas y los huracanes, al pasar de los frentes fríos y llegar de la zona de convergencia intertropical (ZTIC) (López Quiroz & Loranca Domínguez, 2022; Andrade-Velázquez, 2017).

Pero no es homogéneo en todo el país; las precipitaciones registradas en México indican que en el norte del país obtiene menos precipitación que el sur. Otra fuente de precipitaciones en el país son los ciclones tropicales. En el Océano Pacífico esta temporada inicia el 15 de mayo, y el 01 de junio inicia en el Océano Atlántico, en ambos litorales esta temporada concluye el 30 de noviembre (García, 1974).

El sureste de México es caracterizado por un clima tropical, principalmente en la categoría de húmedo cálido (INEGI, 2023). Es una de las zonas de interés económico del gobierno federal, dónde se desarrolla el proyecto del Tren Maya (2023), que pretende impulsar la economía de las comunidades locales. No obstante, esta zona, ha sido un atractivo turístico a nivel nacional e

internacional, principalmente las playas del estado de Quintana Roo (PROFECO, 2023). Villegas y Carrascal (1999) reportaron que las actividades turísticas han afectado el medio ambiente, debido a la contaminación del aire y agua, modificaciones a la cobertura vegetal y provocando cambios en las precipitaciones y temperatura diurna.

Quintana Roo se localiza en la parte oriental de la península de Yucatán, con una composición geológica más o menos homogénea. Mayormente constituida por estratos calizos, cuyas mayores alturas se acercan a los 300 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2002). Fragoso-Servón *et al.* (2014), reporta que existen además pisos altitudinales regionales que presentan de muy alta a baja geodiversidad que se relaciona con una alta biodiversidad.

El estado de Quintana Roo es menos caluroso en enero, mientras que en mayo, junio, julio y agosto son los meses más cálidos. Tiene registrado precipitaciones abundantes, ya que su temporada lluvia comprende de mayo a octubre; la precipitación anual está registrada entre los 800 a 1500 mm, siendo en la costa donde se tiene las mayores precipitaciones del estado (INEGI, 2002). Las precipitaciones en el estado, sigue el mismo régimen que la zona sureste, de mayo a noviembre por ciclones tropicales y la zona de convergencia intertropical (Andrade-Velázquez & Montero-Martínez, 2023). La precipitación es importante para alimentar los cuerpos de agua en continente. En México existen 653 cuerpos de agua, de los cuales, 4 se encuentran en la Península de Yucatán (INEGI, 2018). Aproximadamente 4,000,000 de personas depende de estos cuerpos de agua, por lo que la disponibilidad de agua en esta zona es una de las más importantes en todo México (CONAGUA, 2018). En Quintana Roo, el acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua para las comunidades y zonas urbanas (Sánchez, *et al.* 2016)

La cultura importante en la zona es la maya y entre sus comunidades se localizan varios municipios de interés local por la riqueza cultural que ofrecen, el municipio de Felipe Carrillo Puerto es uno de ellos (Felipe Carrillo Puerto, 2023).

El presente trabajo está enfocado a determinar los eventos húmedos y secos en el municipio de Felipe Carrillo Puerto. Para ello se utiliza el SPI y la propuesta del factor areal. La metodología se describe en la siguiente sección. Posteriormente se muestran los resultados y al final sus conclusiones.

Material y Métodos

Zona de estudio

Felipe Carrillo Puerto está ubicado en el estado de Quintana Roo, México; en la región central del estado, con coordenadas geográficas Latitud: 19.578611, Longitud: 88.045278; altitud entre 0 y 100 m. Pertenece a la Región Hidrológica Yucatán Este (Quintana Roo) y Bahía de Chetumal. Tiene algunos cuerpos de agua superficiales, a pesar de que su suelo está formado por la misma roca caliza del resto de la península de Yucatán, que impide las corrientes de agua superficiales (INEGI, 2009).

Datos utilizados

Se utilizaron series temporales de datos mensuales de precipitación; los datos fueron obtenidos de la red de estaciones climáticas superficiales CLICOM. Ubicadas en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo (Figura 1).

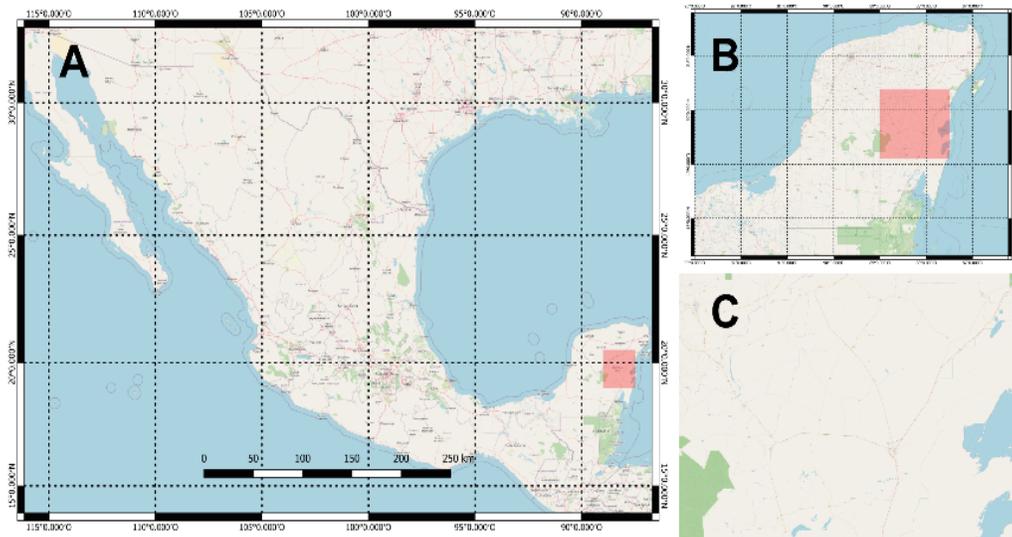


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. (A) Territorio mexicano. (B) Península de Yucatán. (C) Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo.

En la tabla 1 se muestra la distribución de los datos completos obtenidos de cada estación y en las figuras (Figura 2, Figura 3, Figura 4) observamos las gráficas de la precipitación mensual de cada estación utilizando los datos completos. De igual manera, observamos en la tabla un porcentaje de datos, esto se debe a que los espacios en blanco en las gráficas son datos faltantes.

Es importante mencionar, que las estaciones tienen variaciones en los rangos de años de los datos, por lo que se decidió cortar los rangos y usar los datos desde un mismo año (1972 – 2012).

Tabla 1. Datos completos de las estaciones utilizadas.

NÚMERO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	RANGO DE AÑOS DE LOS DATOS	PORCENTAJE DE DATOS (%)	CANTIDAD DE DATOS CONTENIDOS DE 1972 AL 2012
23003	FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO	1952 – 2012	97.24	472
23031	X-PICHIL – QROO	1961 – 2012	85.37	486
23022	SEÑOR – QROO	1971 - 2012	99.04	419

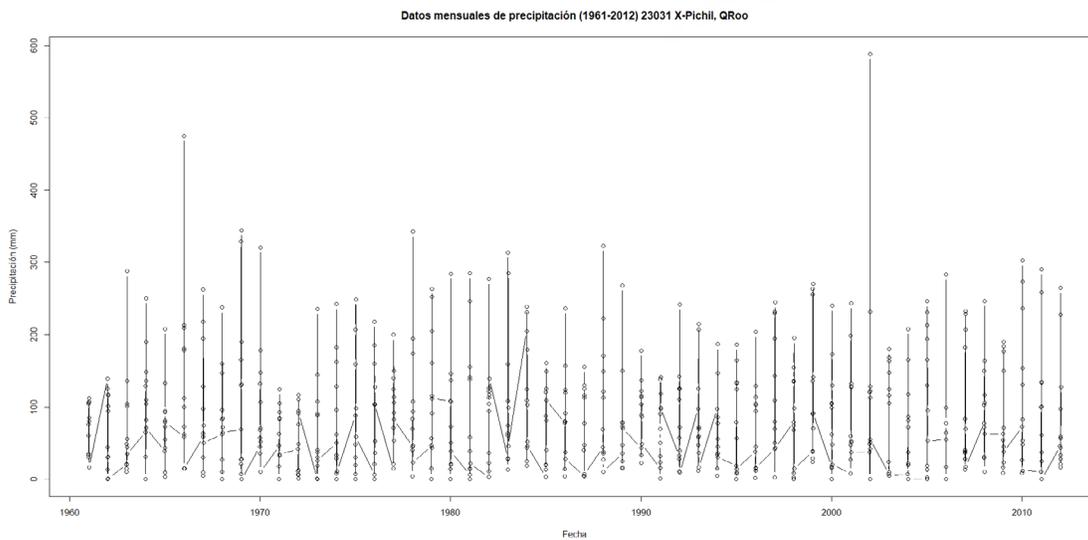


Figura 2. Gráfica de la precipitación mensual de la estación FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO de 1952 al 2012

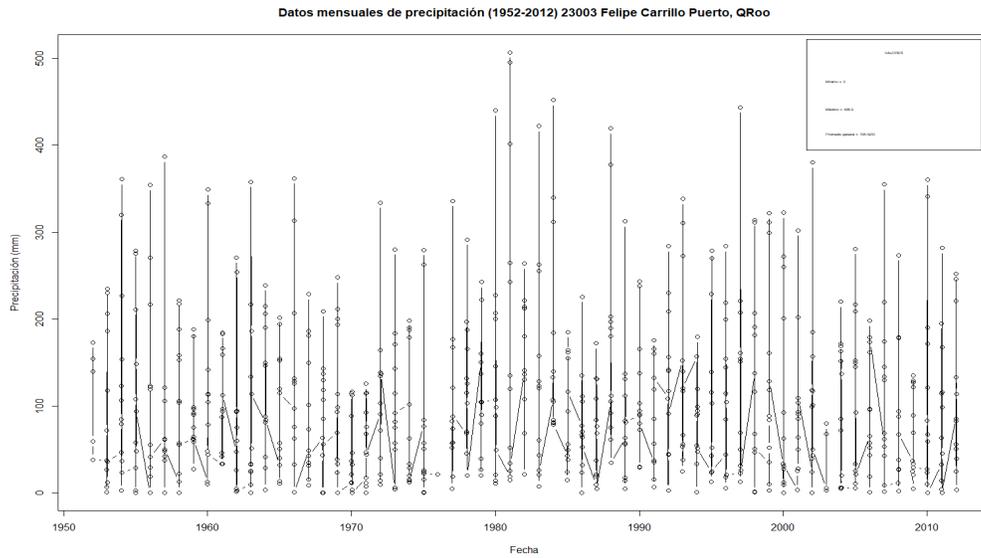


Figura 3. Gráfica de la precipitación mensual de la estación X-PICHIL – QROO de 1971 al 2012

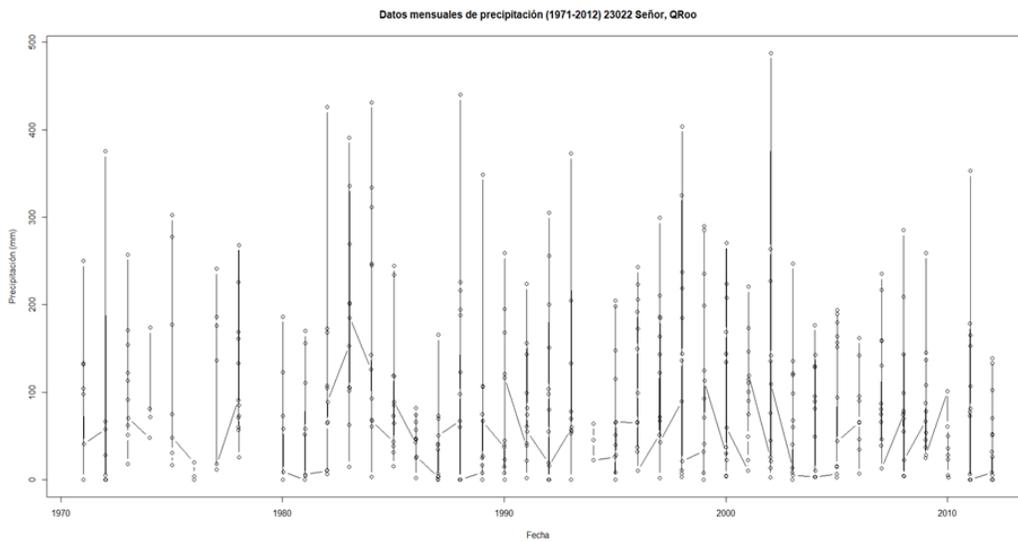


Figura 4. Gráfica de la precipitación mensual de la estación SEÑOR – QROO de 1961 al 2012

Diagrama de Voronoi

Para determinar la Precipitación Media sobre el área de estudio se utilizó el método de Diagrama de Voronoi. El Diagrama de Voronoi fue definido en 1907 por un ucraniano matemático de nombre Geogy Vornoi. Aunque también es conocido como Polígonos de Thiessen por el estadounidense meteorólogo Alfred Thiessen, quien aplicó este método para la predicción del tiempo atmosférico en 1911 (Fortune, 1986).

Un Diagrama de Voronoi es un tipo de patrón que se sigue al recubrir una superficie tomando en cuenta la distancia. Se logra un tipo de formación geométrica que permite la partición del plano. Dicha partición se basa en fraccionar el plano geométrico en tantas regiones como puntos se tenga, de tal manera que cada punto tendrá designado la región formada por todo lo que está más cerca de él que ninguno (De Berg *et al.*, 2008).

Este método se utiliza cuando el área de estudio tiene una distribución irregular de estaciones. Se basa en examinar el valor de la precipitación de cada estación climatológica en función del área de influencia (Moreno Rodríguez & Montero Torres, 2016).

Precipitación media

La Precipitación Media se obtiene calculando el promedio de las tres estaciones. Nosotros proponemos que el cálculo sea de la siguiente manera.

La precipitación media resultará de la sumatoria del producto de la precipitación de cada estación por el coeficiente del área de cada estación entre el área en general:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \frac{A_i}{A} \quad \text{Ecuación(1)}$$

Donde:

\bar{P} : Precipitación Promedio.

P_i : Precipitación observada en la estación i .

A_i : Área del polígono correspondiente a la estación i .

A : Área total de la zona de estudio.

n : Número de estaciones.

Índice estandarizado de precipitación

El índice de precipitación estandarizado o SPI (por sus siglas en inglés) fue desarrollado en 1993 por McKee y colaboradores, con el propósito de tener una mejor calidad de detección del inicio de las sequías y su monitoreo. Principalmente es utilizado para la evaluación de la ocurrencia de déficit o los excesos significativos de la precipitación en una región determinada con diferentes escalas de tiempo (McKee *et al.*, 1993). El SPI se calcula para diferentes escalas de tiempo que van desde 3 hasta 48 meses. Los valores del SPI van de +3 a -3; se considera un periodo de sequía cuando el SPI tiene valores consecutivos que son negativos, y el periodo de sequía termina cuando el valor del SPI se vuelve positivo (NCAR, 2017).

La siguiente tabla indica el rango del Índice de Precipitación Estandarizada utilizada por McKee y otros (McKee *et al.*, 1993):

Tabla 2. Rango del Índice de Precipitación Estandarizada.

VALOR	CATEGORÍA
Mayor a 2.0	Humedad extrema
2.0 a 1.5	Humedad severa
1.5 a 1.0	Humedad moderada
1.0 a -1.0	Cerca de lo normal
-1.0 a -1.5	Sequía suave
-1.5 a -2.0	Sequía severa
Menor a -2.0	Sequía extrema

Fuente: Adaptado de McKee *et al.* (1993).

En una escala temporal relativamente corta (1, 3 o 6 meses) pueden ocurrir anomalías de precipitación que pueden cambiar las condiciones de humedad en el suelo. En cambio, en una escala temporal de 12, 24, 36 o 48 meses revelan anomalías de lluvias por el cambio de las corrientes superficiales, subterráneas y de los reservorios (Svoboda & Hayes, 2011).

El cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada se basa en el registro mensual de la precipitación, en donde cada mes se establece un nuevo valor a partir de los meses anteriores. Cada uno de estos datos se van ajustando a la función "Gamma", esto para poder definir la relación que existe entre la probabilidad y la precipitación (McKee *et al.*, 1993).

La distribución Gamma se define por su frecuencia o su función de densidad de probabilidad (para detalle ver el anexo A):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \text{ para } x > 0 \quad \text{Ecuación(2)}$$

Donde x es la cantidad de la precipitación observada, α y β son los parámetros de forma y de escala. $\Gamma(\alpha)$ es una función que está definida por la integral:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

En este caso, los parámetros α y β , se evalúan para cada escala de tiempo determinado (3 meses, 12 meses, 48 meses, etc.).

Resultados

En la Figura 5 observamos la distribución geográfica y el área de interés de las tres estaciones, determinado mediante el diagrama de Voronoi. En la siguiente tabla 3 se indica el área de cada polígono, su porcentaje del área total y el promedio areal correspondiente. El área total del diagrama de Voronoi es de 2568.88 km².

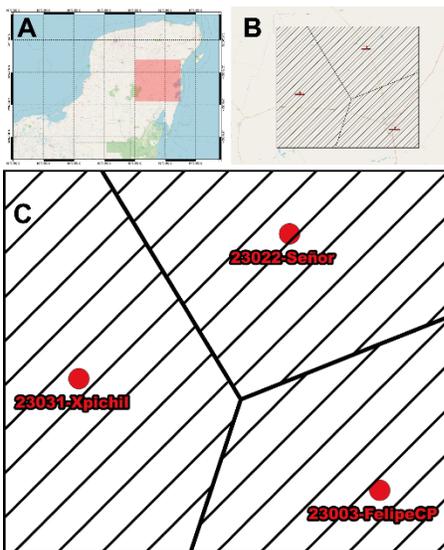


Figura 5. Diagrama de Voronoi. (A) ubicación en el país y (B) ubicación en la zona. (C) Diagrama de Voronoi ampliado.

En la Figura 6, se muestran las series de tiempo de la precipitación mensual de cada estación, el valor máximo de precipitación registrado de 1972 al 2012 en la figura 6-A es 506.9 mm, en la figura 6-B es 588.5 mm, en la figura 6-C es 487.7 mm Cabe mencionar, que el valor máximo en la figura 6-A y 6-B fueron registrados en el mismo mes y año (septiembre 2002). Por otro lado, en la siguiente Tabla 3 tenemos el promedio general de la precipitación de cada estación, siendo la estación más cercana (FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO) al punto de interés con el promedio general mayor de precipitación. Pero, de acuerdo al diagrama de Voronoi realizado, ésta misma estación es la del polígono con menor área.

Notamos que la distribución de área es mayor para la estación X-PICHIL - QROO, con un 40% de la total, mientras que el área de la estación más cercana a la zona de estudio es un poco más del 26%. Esto determinará la distribución de la precipitación en el área de acuerdo a su porcentaje.

En la tabla 3, vemos que la precipitación promedio para Felipe Carrillo Puerto es de 30 mm por cada km². Este resultado se discutirá más adelante.

Tabla 3. Datos de cada área de cada estación.

	23003-FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO	23031-X-PICHIL – QROO	23022-SEÑOR – QROO
Área (km²)	684.52	1054.45	829.91
Porcentaje areal	26.65%	41.05%	32.30%
Precipitación Media Areal (mm/km²)	30.044	37.328	31.428

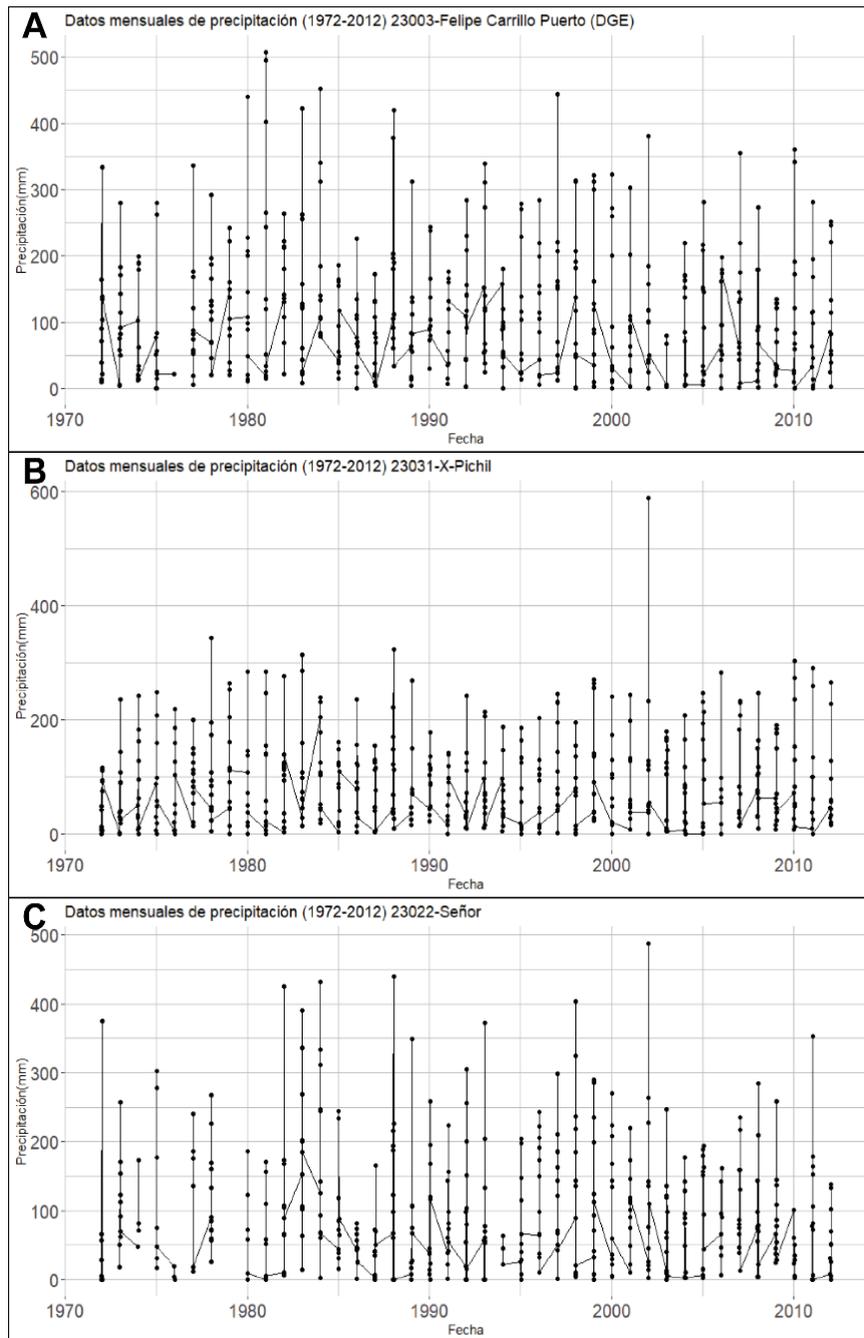


Figura 6. Series de tiempo de la precipitación mensual de 1972 al 2012 de cada estación estudiada.

(A) Estación FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO. (B) Estación X-PICHIL – QROO. (C) Estación SEÑOR – QROO.

Las figuras 6A y 6C tienen comportamientos similares, siendo entre 1980 y 1985 el periodo más lluvioso. Sin embargo, en la figura 6B la precipitación se mantiene casi con la misma intensidad, es decir, no varía con el pasar de los años; aunque es importante mencionar que en esta misma gráfica hay muchos meses vacíos entre 1972 y 1980, es decir, en estos meses por razones desconocidas no se registró la precipitación.

De las mismas figuras notamos que con excepción de los eventos máximos, las tres estaciones mantienen una precipitación similar.

La figura 7 es el resultado del promedio de la precipitación mensual entre las tres estaciones estudiadas (Estación 23003-FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE), Estación 23031-X-PICHIL - QROO, estación 23022-SEÑOR - QROO), teniendo que el valor máximo de precipitación es de 485.5 mm en septiembre 2002. En la Tabla 5 reportamos los promedios de la precipitación mensual durante el periodo de 40 años (1972-2012). En la misma tabla observemos que la mayor precipitación se tiene en la estación FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE23003-Felipe Carrillo Puerto (DGE)).

En la Tabla 6 observamos el promedio de la precipitación de cada mes del periodo de 1972 al 2012 de cada estación. Esta tabla nos permite observar el aumento o disminución de la precipitación en todos los meses del año.

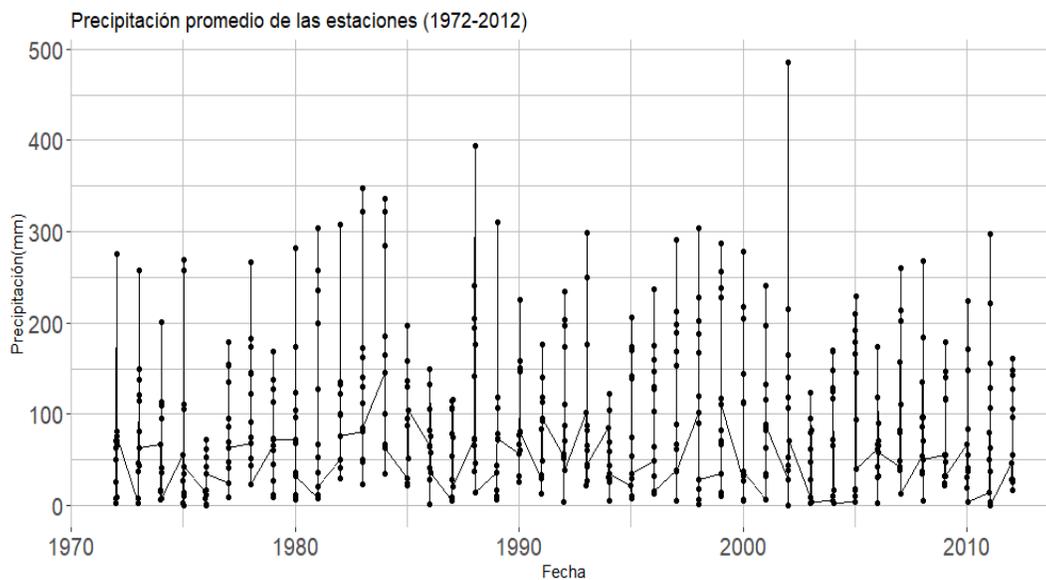


Figura 7. Serie de tiempo de la precipitación promedio de las tres estaciones estudiadas de 1972 al 2012

La precipitación promedio de cada mes en cada estación mantiene el mismo comportamiento para las tres estaciones. Esto nos indica que la climatología de la precipitación es la misma en la región circundante de la zona de estudio. Se presenta precipitación a lo largo del año, con precipitaciones máximas de aproximadamente 40 mm para los meses de invierno, mientras que para el verano las precipitaciones son mayores de mayo a octubre, del orden mayor a los 100 mm, ya que la temporada de Ciclones en el Atlántico son de junio a noviembre (CONAGUA, 2023).

Tabla 4. Promedio general de la precipitación en cada estación de 1972 al 2012

Promedio general de la precipitación (mm) en cada estación de 1972 al 2012		
23003-FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO	23031-X-PICHIL – QROO	23022-SEÑOR – QROO
112.75	90.94	97.28

Tabla 5. Promedio de la precipitación de cada mes de cada una de las estaciones de 1972 – 2012.

Promedio de la precipitación (mm) de cada mes de la estación 23003-FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO de 1972 al 2012											
enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
54.82	49.77	39.36	40.53	116.51	173.88	149.11	159.88	206.17	173.78	82.79	55.67
Promedio de la precipitación (mm) de cada mes de la estación 23031-X-PICHIL – QROO de 1972 al 2012											
47.07	37.34	31.97	36.92	93.19	136.99	132.55	142.74	192.16	130.36	69.58	43.22
Promedio de la precipitación (mm) de cada mes de la estación 23022-SEÑOR – QROO de 1972 al 2012											
43.77	40.85	32.14	46.33	105.81	151.74	113.83	136.66	216.93	150.03	79.14	47.4

A continuación, se presentan los resultados de los cálculos del índice Estandarizado de Precipitación (SPI) de cada estación. Analizando cada una de estas figuras, se observa que hay diferentes patrones en los eventos secos y húmedos para cada estación. Se calculó el SPI para una ventana de 3 meses, 12 meses y 36 meses para un análisis de corto y largo alcance temporal de los eventos secos y húmedos.

La estación más cercana al punto de interés 23003-FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO (Figura 8) tiene valores de sequía extrema (SPI menor a -2.0) estos periodos son muy cortos de uno o dos años. Sin embargo, los periodos húmedos son de 2 a 3 años, teniendo valores de humedad extrema (SPI mayor a 2.0). Lo anterior se observa principalmente en el cálculo del SPI-12 (12 meses).

En cambio, con este mismo SPI-12, en la estación 23031-X-PICHIL – QROO (Figura 9) la intensidad de las sequías no varía mucho, en todo el periodo que abarca de 1972 al 2012 mantiene sus valores del SPI mayormente entre cerca de lo normal (SPI de 1.0 a -1.0) y sequía suave (SPI de -1.0 a -1.5).

La estación SEÑOR - QROO23022 muestra para el SPI-12 (Figura 10), que la intensidad de las sequías se mantiene similar a la estación anterior. Ésta estación es la que menos datos registrados tiene.

Cabe mencionar que el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) con periodos de 36 meses (Figura 10), no se pudo determinar para los primeros 10 años, esto debido a que hay muchos datos faltantes en ese lapso de tiempo.

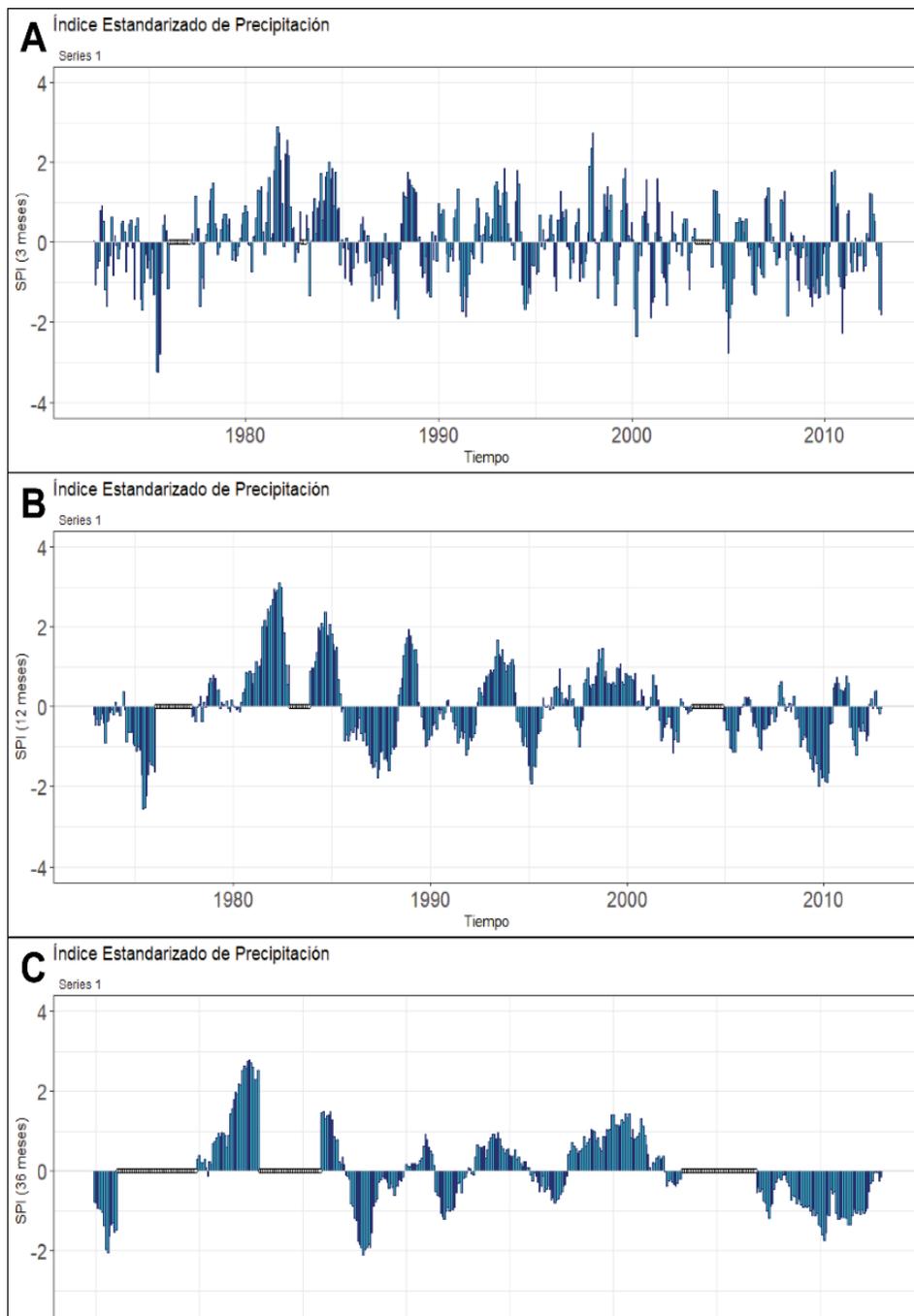


Figura 8. Índice estandarizado de precipitación (SPI) de (A) 3 meses, (B) 12 meses y (C) 36 meses de la estación FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO del periodo 1972 al 2012

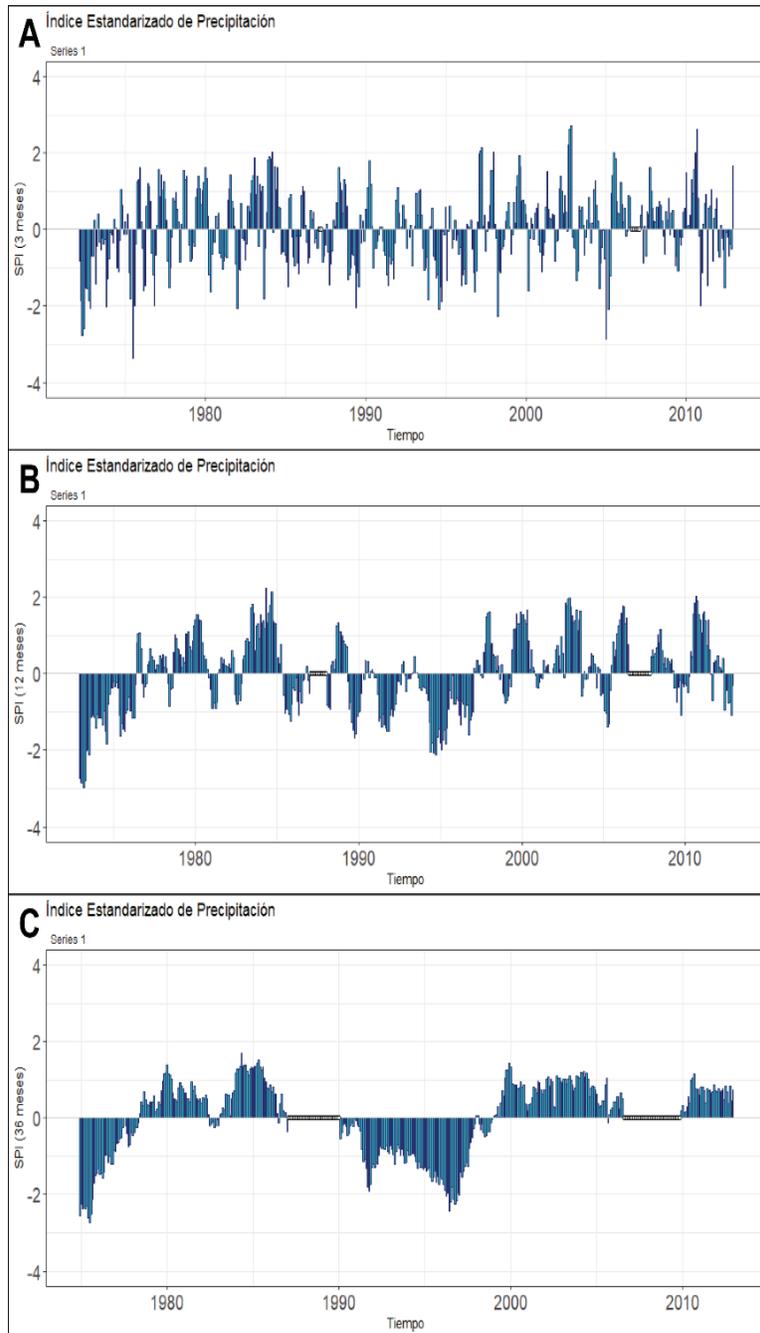


Figura 9. Índice estandarizado de precipitación (SPI) de (A) 3 meses, (B) 12 meses y (C) 36 meses de la estación X-PICHIL – QROO del periodo de 1972 al 2012.

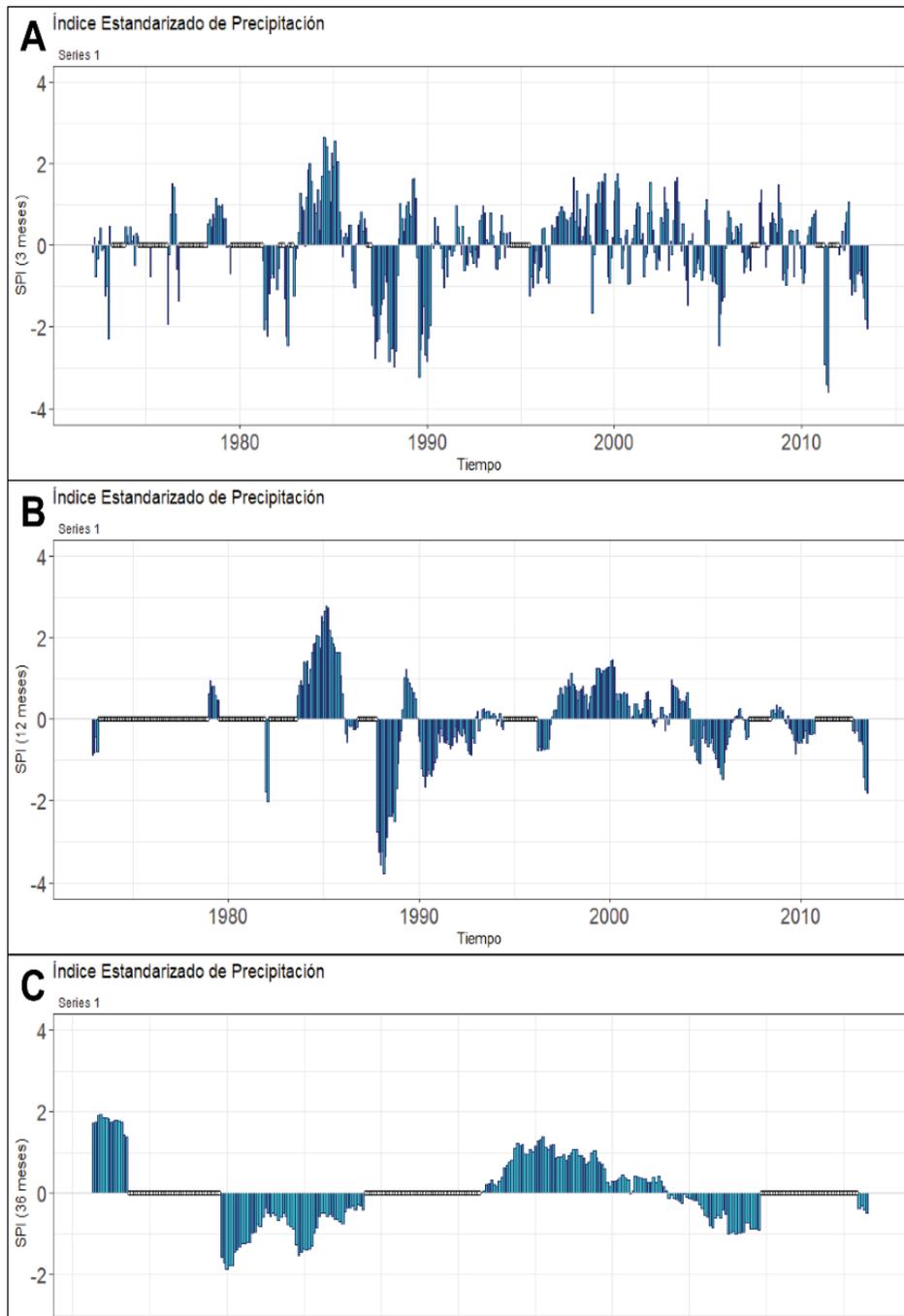


Figura 10. Índice estandarizado de precipitación (SPI) de (A) 3 meses, (B) 12 meses y (C) 36 meses de la estación SEÑOR – QROO del periodo de 1972 al 2012.

Las siguientes figuras (Figura 11, Figura 12, Figura 13) son el resultado del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) de la Precipitación promedio de las tres estaciones estudiadas, de la Precipitación promedio con el factor areal de la zona de estudio y de la Precipitación areal en la zona de la estación más cercana al punto de interés.

Éstos SPI fueron calculados para periodos de 3 meses (Figura 11), 12 meses (Figura 12) y para 36 meses (Figura 13). Analizando estos tres cálculos, se observa que la corrección del factor de área, conserva los patrones de los eventos, sólo cambia la intensidad de las misma, dado que el factor areal distribuye la precipitación en el área asignada por cada diagrama de Voronoi.

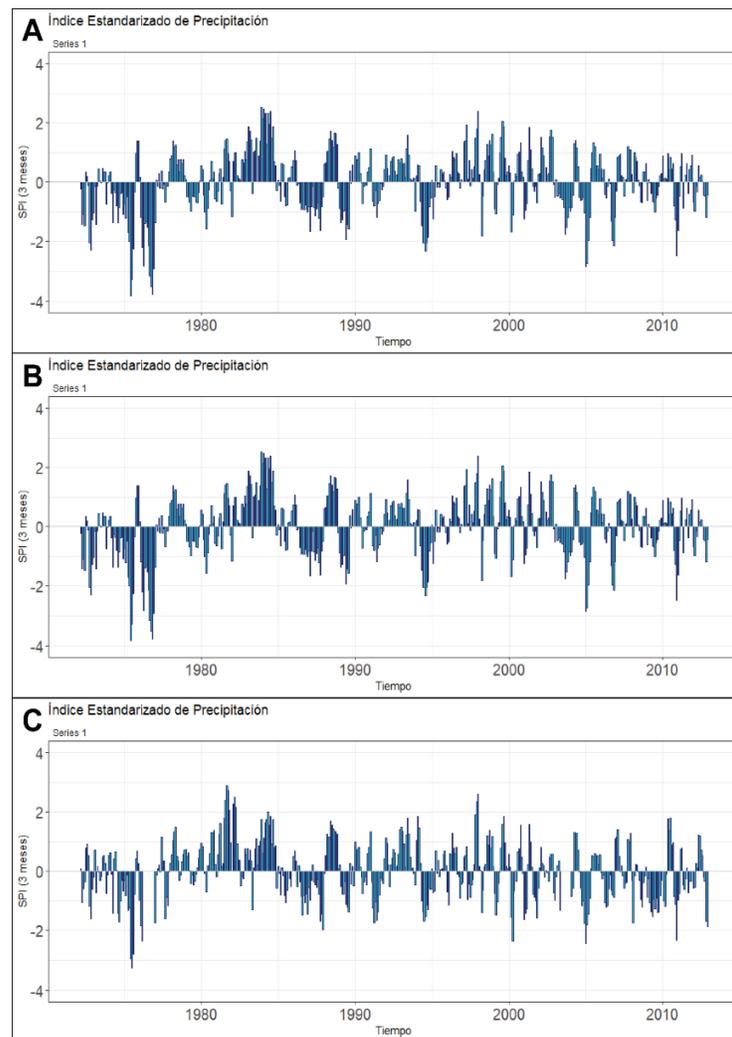


Figura 11. Índice estandarizado de precipitación (SPI) de 3 meses de la (A) Precipitación promedio, (B) la precipitación promedio areal y (C) la precipitación areal de la estación FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO del periodo de 1972 al 2012.

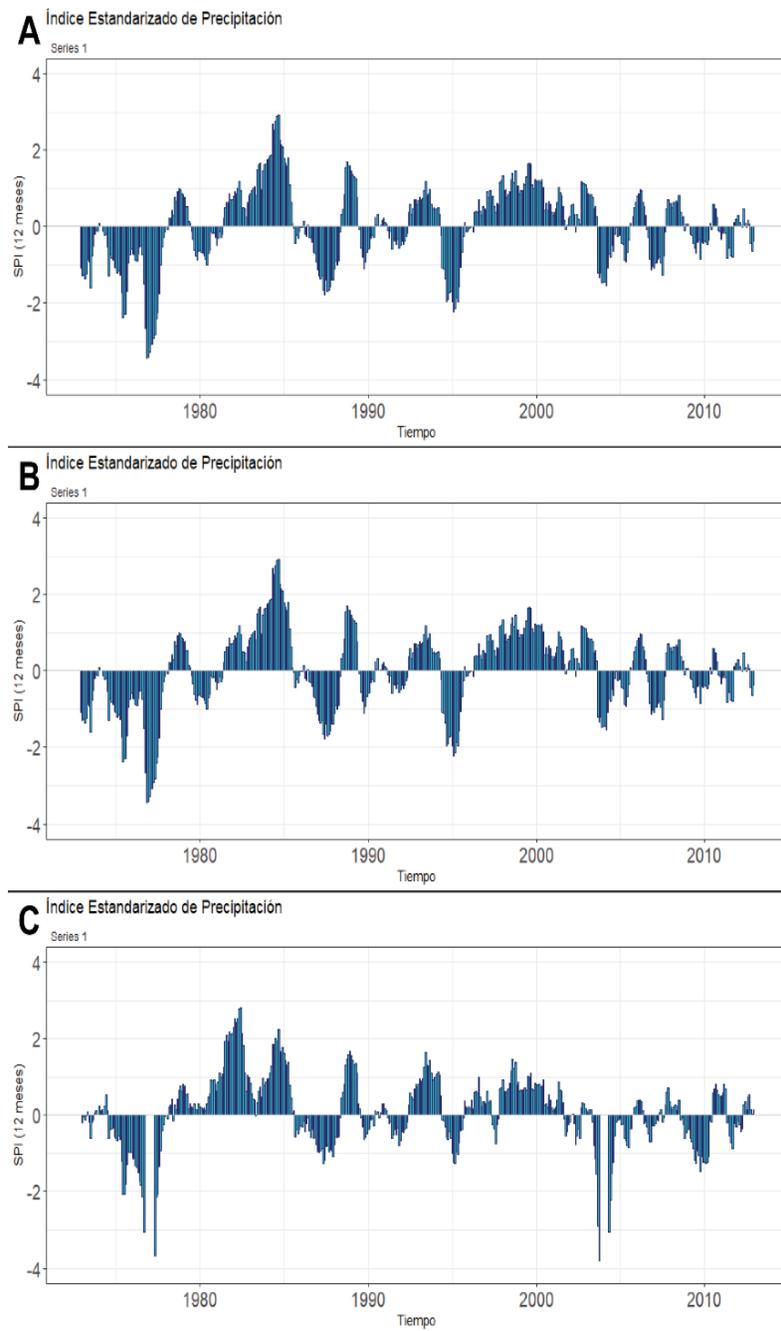


Figura 12. Índice estandarizado de precipitación (SPI) de 12 meses de la (A) Precipitación promedio, (B) la precipitación promedio areal y (C) la precipitación areal de la estación FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QRoo del periodo de 1972 al 2012.

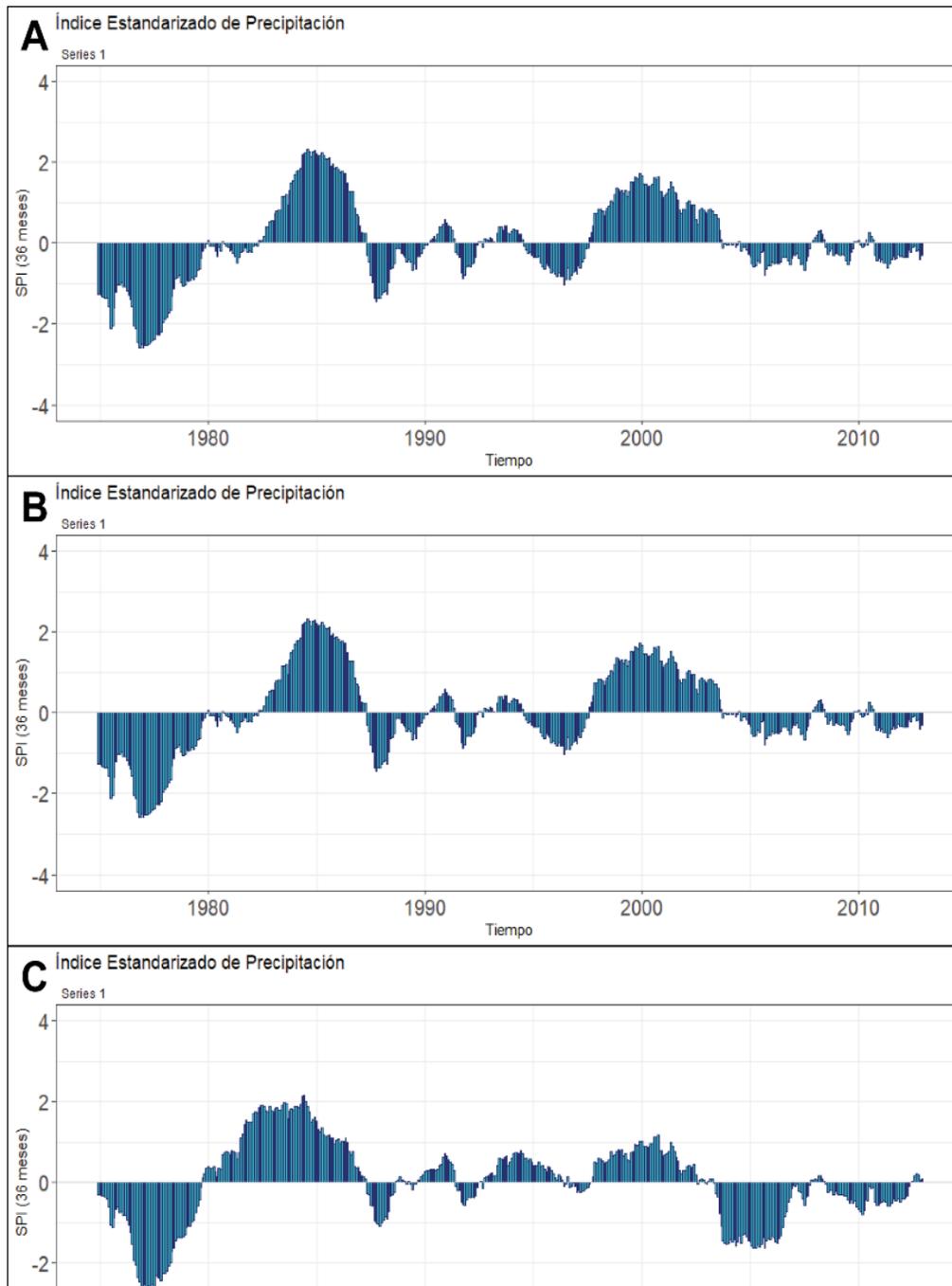


Figura 13. Índice estandarizado de precipitación (SPI) de 36 meses de la (A) Precipitación promedio, (B) la precipitación promedio areal y (C) la Precipitación areal de la estación FELIPE CARRILLO PUERTO (DGE) – QROO del periodo de 1972 al 2012.

Discusión

El presente estudio ha realizado un análisis histórico de la precipitación en el poblado de Felipe Carrillo Puerto mediante el uso de la información de las tres estaciones circundantes a la zona de estudio y la propuesta del factor areal (A_i/AT) para la distribución de la precipitación en dicha zona. Esta propuesta nos permite obtener la precipitación promedio en Felipe Carrillo Puerto y encontrar sus patrones de precipitación a lo largo del período de tiempo de 1972-2012, correspondiente a 40 años, como es recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1994).

Se pudo determinar el comportamiento de la precipitación a lo largo del ciclo anual durante esos 40 años, encontrando una precipitación promedio de 40 mm para los meses de invierno y por arriba de los 100 mm en los meses verano. Esto sabemos corresponde a los eventos hidrometeorológicos del sureste mexicano, como son el paso de frentes fríos para el invierno y la presencia de ciclones tropicales sumado a la zona de convergencia intertropical en los meses de verano (Andrade-Velázquez, 2017)

Por otro lado, con el cálculo del SPI para ventanas temporales de 3 meses, 12 meses y 36 meses se determinaron los eventos secos y húmedos en la zona de estudio. Encontramos con SPI-3 que los eventos estacionales han sido de mayor intensidad para la década de los 80's, mientras que para años recientes (2010's) han sido menos intensos, tanto en humedad como sequedad. Con el SPI-12 notamos la misma información en un periodo anual, donde su duración se amplía en año, es decir, nos permite determinar los años secos y húmedos. Mientras que el SPI-36 nos brinda la duración de episodios largos de 3 años para los eventos secos y húmedos. En este caso, para la estación cercana a Felipe Carrillo Puerto, en los últimos años se han presentado eventos mayormente secos, contrario a lo que reporta la estación X-PICHIL, donde se observan eventos húmedos.

En la figura 14 observamos que mientras que Felipe Carrillo Puerto se encuentra más cerca de la costa, X-PICHIL se encuentra más adentro al continente. Este contraste entre los eventos, la atribuimos a factores locales, pudiendo ser el tipo de vegetación y orografía en cada una de las regiones. En el caso de la estación Señor, se encuentra más hacia el norte del poblado de Felipe Carrillo Puerto además que la falta de información en sus registros para algunos meses durante el periodo 1972-2012 no nos permite tener un referente en SPI-12 como SPI-36.

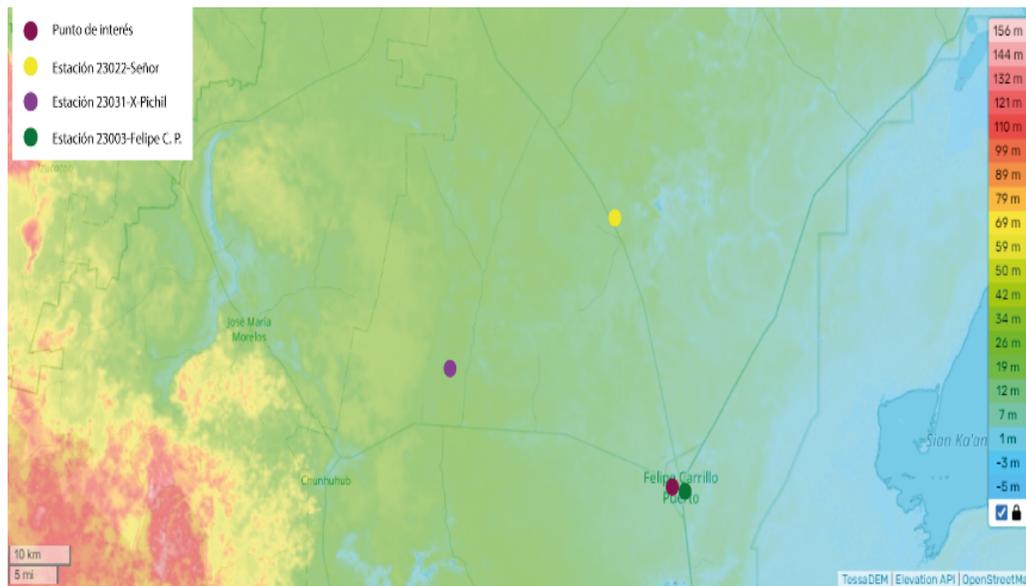


Figura 14. Mapa topográfico de altitud y relieve de Quintana Roo.

Por lo anterior, es conveniente contar con un análisis de la precipitación con un factor areal para la zona de estudio con respecto a la estación más cercana que obtener la precipitación promedio simple. Las figuras 11-13 muestra los cálculos del SPI-3, SPI-12 y SPI-36 respectivamente para el promedio simple de las tres estaciones (inciso A), para el promedio areal de las tres estaciones (inciso B) y para solamente la estación de Felipe Carrillo Puerto (inciso C). Notamos que mientras las gráficas A y B mantienen los patrones de eventos secos y húmedos, dado que sólo se modifica la intensidad por el factor $(1/AT)$. En el caso de las gráficas C, si notamos cambios en la temporalidad de los eventos secos y húmedos, pero esto se debe a qué se está tomando sólo una de las estaciones, lo cual nos da mayor confiabilidad en el análisis, dado que se trata de la estación más cercana, es decir, se tiene la misma información sólo modificada en un factor de (Ai/AT) . Este resultado nos permite asegurar que la precipitación en cualquier punto dentro del polígono de la estación de Felipe Carrillo Puerto mantendrá un comportamiento cercano a esta estación, cuyas condiciones locales son similares, que, a obtener un comportamiento del promedio de las tres estaciones, dónde las tres estaciones muestran patrones diferentes en la precipitación. Con esto mostramos que el análisis de precipitación ponderado con un factor arial nos permite determinar los eventos secos y húmedos de la zona de estudio, de acuerdo con la metodología propuesta.

Por otro lado, el presente análisis muestra que los eventos secos y húmedos de la zona de estudio son más intensos, pasando de severos a extremos, de acuerdo a McKee *et al.*, (1993), antes de 1985, posteriormente estos eventos son de normal a severos. Cabe señalar que Magaña *et al.* (2003) han indicado que El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) tiene influencia en la presencia de eventos secos y húmedos en México. Méndez y Magaña, (2010) reportan que existe influencia de la combinación de ENSO, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) en un dipolo geográfico (Norte-Sur) del país. Otros autores reportan estudios similares en otras partes del mundo (Abiy *et al.* 2019; Jia *et al.* 2021). La figura 15 muestra el comportamiento del índice oceánico del Niño (oni; NOAA, 2023) indicando los episodios Niño ($>0.5^{\circ}\text{C}$) y Niña ($<0.5^{\circ}\text{C}$). Notámos que la variabilidad del SPI-12 sigue el comportamiento del índice, lo que asumimos que existe una influencia para la zona de estudio del ENSO. Mientras que Olivera-Villaroel *et al.* (2021) reporta que antes de 1985, la PDO se encontraba en fase positiva y posterior en fase negativa. Teniendo en cuenta los estudios anteriores sugerimos que la PDO tiene influencia en la intensidad de los eventos secos y húmedos de la precipitación en la zona de estudio. Estos resultados son indicados por primera vez para la zona de estudio, en el estado de Quintana Roo. Notámos que existen estudio a nivel nacional (Magaña *et al.* 2003; Bravo-Cabrera *et al.* 2017), región Norte (Hallack-Alegria & Watkinz, 2007; Méndez *et al.* 2010) o sureste en la Cuenca Grijalva-Usumacinta (Golicher *et al.*, 2006; Andrade-Velazquez & Medrano-Perez, 2020), pero para la zona de estudio este trabajo provee un análisis climático de la precipitación.

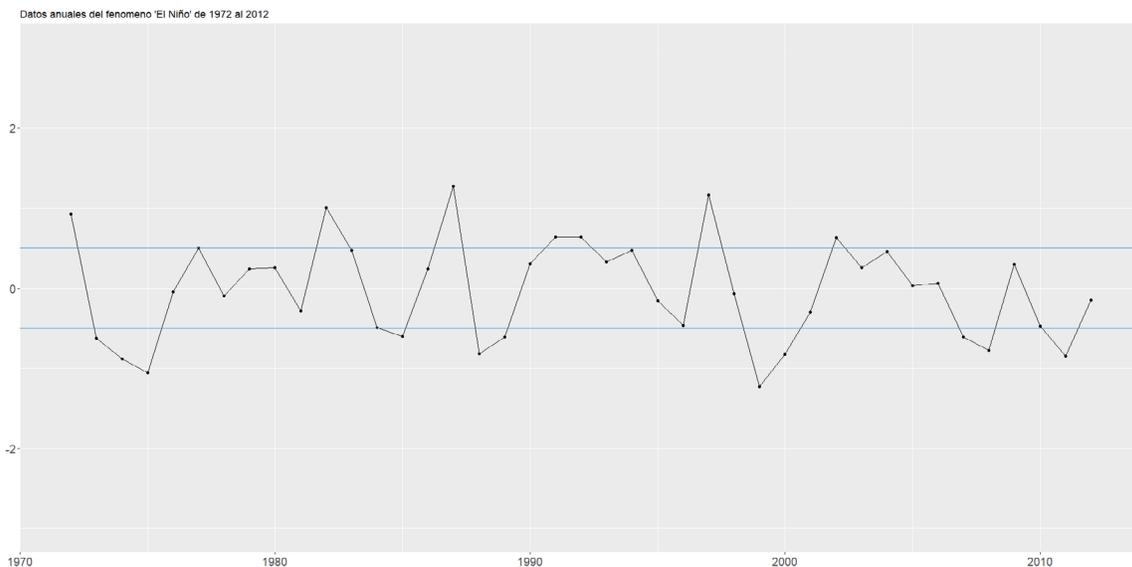


Figura 15. Gráfica del índice oceánico el niño.

Fuente:NOAA, 2023.

Conclusiones

En conclusión, un estudio similar al presentado aquí, no se ha hecho para la zona de estudio, lo cual nos permite caracterizar la precipitación para entender el clima reciente en el Poblado de Felipe Carrillo Puerto. Se mostró que el promedio de las tres estaciones suaviza los patrones de cada estación, por lo que es mejor contar con un factor areal mediante la asignación de un área a la estación más cercana para determinar la precipitación en los puntos dentro de esa área. Por último el estudio sugiere la influencia de ENSO y PDO en la precipitación de la zona de estudio.

Notamos que, en el Poblado Felipe Carrillo Puerto, se ha presentado en los últimos años de 2007-2012 eventos más secos que húmedos. Esto sirve para entender el clima local y sus posibles efectos en el poblado. Creemos que esto puede explicar que cuerpos de agua se encuentren secos, como es el caso del cenote de “La Cruz Parlante”. Sin embargo. Este estudio se enfoca solamente al análisis climático, para proveer información para estudios de aplicaciones o impactos. Se requiere de complementar con estudios sociales y ambientales, lo cual esta fuera de alcance de las autoras.

Contribución de los autores

“Conceptualización del trabajo, Andrade-Velázquez, M.; desarrollo de la metodología, Andrade-Velázquez, M.; manejo de software, Vargas-Magaña, M. F.; validación experimental, Andrade-Velázquez, M.; análisis de resultados, Andrade-Velázquez, M. & Vargas-Magaña, M.F.; Manejo de datos, Vargas-Magaña, M. F.; escritura y preparación del manuscrito, Andrade-Velázquez, M. & Vargas-Magaña, M.F.; redacción, revisión y edición, Andrade-Velázquez, M. & Vargas-Magaña, M.F; administrador de proyectos, Andrade-Velázquez, M.; adquisición de fondos, Andrade-Velázquez, M.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Agradecimientos

Agradecemos al programa de prácticas profesionales entre la División de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y el Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad. Al programa de Investigadores por México del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. Al Dr. Martín José Montero Martínez por algunas sugerencias.

Anexos

ANEXO A: DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN GAMMA.

La distribución Gamma se define por su frecuencia o su función de densidad de probabilidad:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \text{ para } x > 0 \text{ Ecuación(2)}$$

Donde:

α : Parámetro de forma ($\alpha > 0$)

β : Parámetro de escala ($\beta > 0$)

x : Cantidad de precipitación ($x > 0$)

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \Gamma(\alpha) \text{ es la función Gamma (Edwards & McKee, 1997).}$$

En este caso, los parámetros α y β , se evalúan para cada escala de tiempo determinado (3 meses, 12 meses, 48 meses, etc.)

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \text{ Ecuación(3)}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \text{ Ecuación(4)}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{|\sum \ln(x)|}{n} \text{ Ecuación(5)}$$

Donde:

n : Longitud de la serie

\bar{x} : Precipitación media en el lapso de tiempo determinado.

La función Gamma cuando es utilizada para el análisis climático, toma como principal interés su integral, donde se obtienen las probabilidades de ocurrencia de una precipitación menor o igual a la de una precipitación determinada. Esta integral antes mencionada es la función de densidad de probabilidades acumulativas:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \text{ para } x > 0 \text{ Ecuación(6)}$$

La función Gamma es indefinida para los valores de $X=0$. Pero una base de datos de precipitación cuenta con valores iguales a cero, por lo que la probabilidad acumulativa se convierte en la siguiente expresión:

$$H(X) = q + (1 - q) \cdot G(X) \text{ Ecuación(7)}$$

Aquí q es la Probabilidad de que ocurra un valor de precipitación igual a cero. Esto se calcula:

$$q = \frac{m}{n}$$

Donde:

m: cantidad de ceros en un lapso de tiempo

n: cantidad total de los datos en el mismo lapso de tiempo (Edwards & McKee, 1997).

Para simplificar el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada, los valores de la probabilidad acumulada $H(X)$, se transforman en valores normalizados, es decir, valores de la variable Z con media igual a cero y varianza igual a uno; donde el SPI toma el valor de Z . Por lo tanto, cuando el SPI tiene valores positivos indica precipitaciones por encima del valor de la media histórica, y los valores negativos indican lo contrario (Edwards & McKee, 1997).

Referencias

- Abiy, A. Z., Melesse, A. M., & Abtew, W. (2019). Teleconnection of regional drought to ENSO, PDO, and AMO: Southern Florida and the Everglades. *Atmosphere*, 10(6), 295. <https://doi.org/10.3390/atmos10060295>
- Andrade-Velázquez, M., & Montero-Martínez, M. J. (2023). Historical and projected trends of the mean surface temperature in South-Southeast Mexico using ERA5 and CMIP6. *Climate*, 11(5), 111. <https://doi.org/10.3390/cli11050111>
- Andrade-Velázquez, M., & Pérez, O. R. M. (2020). Patrones de precipitación en las cuencas Usumacinta y Grijalva (sur de México) bajo un clima cambiante. *Revista Bio Ciencias*, 7(1). <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e905>
- Andrade-Velázquez, M., Soares, D., & García García, A. (2017). La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/la-cuenca-rio-usumacinta/files/assets/basic-html/page58.html ISBN 978-607-9368-81-4
- Base de Datos del CLICOM. (s. f.). CICESE. <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Bravo-Cabrera, J. L., Azpra-Romero, E., Zarraluqui-Such, V., & Gay-García, C. (2017). Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atmosfera*, 30(3). <https://doi.org/10.20937/atm.2017.30.03.03>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2018). Estadísticas del agua en México. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2023). Temporada Ciclones Tropicales 2023. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/temporada-ciclones-tropicales-2023>
- De Berg, M., Cheong, O., Van Kreveld, M., & Overmars, M. (2008). Computational Geometry: Algorithms and Applications. *Springer Science & Business Media*. ISBN 3-540-65620-0
- Edwards, D. C., & McKee (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Atmospheric Science Paper*, 634, 1-30 <http://hdl.handle.net/10217/170176>
- Felipe Carrillo Puerto. (2023). Ayuntamiento de Felipe Carrillo Puerto. <https://www.felipecarrillopuerto.gob.mx/>
- Fortune, S. (1986). A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. *Proceedings of the second annual symposium on Computational geometry - SCG '86*. <https://doi.org/10.1145/10515.10549>
- Fragoso-Servón, P., Pereira, A., Frausto, O., & Bautista, F. (2014). Relación entre la geodiversidad de Quintana Roo y su biodiversidad. Quivera. *Revista de Estudios Territoriales*, 16 (1), 97-125. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40132130006.pdf>
- García, E. (1974). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 50. <https://doi.org/10.14350/rig.30432>
- Gil, R. Z., Pineda, A. H., Correa, M. K. S., & Ramírez, M. C. S. (2018). La vulnerabilidad de México ante el cambio climático: una revisión del Sistema Nacional de Protección Civil. Instituto Belisario Domínguez, 1. <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/4108> ISBN 978-607-8620-05-0
- Golicher, J. D., Ramírez-Marcial, N., & Levy-Tacher, S. I. (2006). Correlations between

- precipitation patterns in southern Mexico and the El Niño sea surface temperature index. *Interciencia*, 31(2), 80-86. http://www.interciencia.org/v31_02/080.pdf
- Hallack-Alegría, M., & Watkins, D. (2007). Annual and Warm Season Drought Intensity–Duration–Frequency Analysis for Sonora, Mexico. *Journal of Climate*, 20(9), 1897-1909. <https://doi.org/10.1175/jcli4101.1>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística [INEGI]. (2018). Agua. Cuéntame de México. <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/cuerpos.aspx?tema=T>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística [INEGI]. (2023). Quintana Roo. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/clima.aspx?tema=me>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística [INEGI]. (2002). Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo (I). ISBN 970-13-3737-9 https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224196/702825224196_1.pdf
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística [INEGI]. (2009). Compendio de información geográfica municipal. Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/23/23002.pdf
- Jia, W., Wang, W., Huang, Y., Ding, Y., Fu, J., & Chen, Z. (2021). Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin. *Water Science and Engineering*, 14(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.12.007>
- López Quiroz, M., & Loranca Domínguez, Y. (2022). Reporte del clima en México. CONAGUA, 8. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Agosto22.pdf>
- Magaña, V., Vázquez, J., Pérez, J. L., & Pérez, J. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313-330. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.3.949>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*. http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/paper_spi.pdf
- Méndez J., Ramírez, A., Cornejo, E., Zárate, A., & Cavazos, T. (2010). Teleconnection of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) to the precipitation and temperature in Mexico. *Investigaciones geográficas*, (73), 57-70. <https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59450/52674>
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188. <https://doi.org/10.1175/2009jcli3080.1>
- Moreno Rodríguez, M. L., & Montero Torres, J. J. (2016). Evaluación de variables climáticas para cuantificar el recurso hídrico disponible en la cuenca media del Río Ranchería [Trabajo de Grado Presentado como Requisito Para Optar al Título de Ingeniero Civil]. Universidad de La Salle, Bogotá. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1158&context=ing_civil
- National Center for Atmospheric Research [NCAR]. (2017). Standardized Precipitation Index (SPI). Climate Data Guide. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2023). Cold & Warm Episodes by Season.

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

- Olivera-Villarroel, S. M., Andrade-Velázquez, M., & Medrano-Pérez, O. R. (2021). Exposición a cambios en el clima en Bolivia. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 12(6), 90-144. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-03>
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (1994). Guía de prácticas Hidrológicas: adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. https://whycos.org/files/chy/guide/168_vol_ii_es.pdf
- Procuraduría Federal del Consumidor [PROFECO]. (2023). México Arena, sol y playas. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/profeco/documentos/mexico-arena-sol-y-playas?state=published>
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., & González, R. A. (julio-agosto, 2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 75-96
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D.A. (2012), Índice normalizado de precipitación, Guía del usuario, Ginebra, Suiza, Organización Meteorológica Mundial (OMM). ISBN 978-92-63-31090-3 https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf
- Tren Maya. Secretaria de Turismo y Fonatur. Gobierno de México. 2023. Available online: <https://www.gob.mx/trenmaya>
- Villegas, G. P., & Carrascal, E. (1999). Tourism development in Cancún, Quintana Roo and its consequences on vegetation. *Investigaciones Geográficas*, 43, 145-166. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n43/n43a10.pdf>