

Tendencia y variabilidad climática: efecto en la producción de maíz en el Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco

Climate trend and variability: effect on maize production in the Atlacomulco Rural Development District

Alejandro Cruz-González¹ 
Ramón Arteaga-Ramírez¹ 
Ignacio Sánchez-Cohen^{2*} 
Jesús Soria-Ruiz³ 
Alejandro Ismael Monterroso-Rivas⁴ 
Héctor Flores-Magdaleno⁵ 

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, km.38.5 carretera México- Texcoco, CP. 56230. Chapingo, Estado de México, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo - Planta - Atmósfera. Margen derecha canal Sacramento km 6.5, Zona industrial, CP. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

³Laboratorio de Geomática - Sitio Experimental Metepec - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 4.5 Carretera Toluca-Zitácuaro, CP. 52107. Zinacantan, Estado de México, México.

⁴Departamento de Suelos-Universidad Autónoma Chapingo. km 36.5, Carretera México- Texcoco, Chapingo, CP. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

⁵Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. km 36.5, Montecillo, CP. 56264. Texcoco, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

Artículo científico

Recibido: 03 de agosto 2023

Aceptado: 01 de diciembre 2023

Como citar: Cruz-González A, Arteaga-Ramírez R, Sánchez-Cohen I, Soria-Ruiz J, Monterroso-Rivas AI, Flores-Magdaleno H (2023) Tendencia y variabilidad climática: efecto en la producción de maíz en el Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. III: e3868. DOI: 10.19136/era.a10nIII.3868

RESUMEN. El objetivo de esta investigación fue analizar las tendencias de precipitación, temperatura máxima y mínima en el Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco (DDRA) para una serie de tiempo del ciclo agrícola primavera-verano para el cultivo maíz (abril-noviembre). El estudio examina la tendencia para el período 1985-2017 de 30 estaciones meteorológicas. Se ha empleado una técnica no paramétrica de Mann-Kendall (MK) para establecer la tendencia estadística en la serie, así como la prueba paramétrica de Regresión Lineal, para conocer la magnitud de esa tendencia. Se encontró que la precipitación, la temperatura máxima y temperatura mínima presentan una tendencia positiva no significativa durante el periodo de estudio, presentando un incremento del 8.5, 4.7 y 12.9%, respectivamente. No obstante, al fraccionar la información en tres series de tiempo, se pudo identificar una tendencia significativa decreciente para la precipitación en el periodo 2007-2017 y en temperatura máxima hacia el periodo 1996-2006. Al analizar individualmente las estaciones meteorológicas, se encontró una heterogeneidad de tendencias, guardando relación entre ellas de acuerdo a su cercanía y condiciones geográficas. A partir del análisis, los resultados confirman que existen cambios en los patrones climáticos en el DDRA que podría impactar la producción de maíz, por lo que es necesaria la participación conjunta de agricultores y gobierno en prácticas de adaptación al cambio climático, implementando políticas ante este fenómeno emergente y ya presente.

Palabras clave: Análisis de tendencia, Cambio climático, Mann-Kendall, Regresión lineal, Producción de Maíz.

ABSTRACT. The objective of this research was to analyze the trends of precipitation, maximum and minimum temperature in the Atlacomulco Rural Development District (DDRA) of the spring-summer agricultural cycle for the corn crop (April-November). The study examines the trend for the period 1985-2017 for 30 weather stations. A non-parametric Mann-Kendall (MK) technique has been used to establish the statistical trend in the series, as well as the Linear Regression parametric test, to determine the magnitude of this trend. It was found that precipitation, maximum temperature and minimum temperature present a non-significant positive trend during the study period, presenting an increase of 8.5, 4.7 and 12.9% respectively. However, by dividing the information into three time series, it was possible to identify a significant decreasing trend for precipitation in the period 2007-2017 and in maximum temperature towards the period 1996-2006. When analyzing the meteorological stations individually, a heterogeneity of trends was found, keeping a relationship between them according to their proximity and geographical conditions. From the analysis, the results confirm that there are changes in the climatic patterns in the DDRA; that influence impact corn production, so; It is necessary the joint participation of farmers and government in adaptation practices to climate change, implementing policies before this emerging and already present phenomenon.

Key words: Trend analysis, Climate change, Mann-Kendall, Linear regression, Corn production.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad y el cambio climático representan una grave amenaza para la seguridad alimentaria de la humanidad, al afectar la productividad y sostenibilidad de los cultivos (Estrada *et al.* 2022). Especies de cultivos como el maíz, el trigo, el arroz, el sorgo, entre otros, son altamente sensibles a la variación de la temperatura y a los cambios en los patrones de lluvia, lo que impacta directamente en su rendimiento (Baffour-Ata *et al.* 2023). Las modificaciones ocurridas en los patrones climáticos, pueden provocar eventos hidrometeorológicos extremos, incendios, daños por frío, plagas y enfermedades, pérdida de biodiversidad y productividad agrícola, por lo tanto; estudiar las tendencias espaciales y temporales es importante para la gestión y mitigación de las actividades agrícolas (Sharma *et al.* 2016). En este sentido, se ha identificado que las reducciones en el rendimiento de los cultivos, son más comunes que los beneficios, como el cultivo de maíz ante el cambio climático (Sánchez *et al.* 2014, Velasco-Hernández *et al.* 2015). Al respecto, Sánchez *et al.* (2014) y Waqas *et al.* (2021) identificaron que el incremento o decremento de la temperatura máxima y mínima del ambiente, tiene repercusiones importantes para el cultivo de maíz. Para el crecimiento óptimo de este cultivo, se requiere de diferentes temperaturas durante el día y la noche (Baffour-Ata *et al.* 2023). Durante el día, la temperatura óptima varía de 25 a 33 °C, mientras que, durante la noche, la temperatura óptima varía de 17 a 23 °C; la temperatura media óptima para toda la temporada de crecimiento es de 20 a 22 °C (Waqas *et al.* 2021). Las temperaturas ideales para el ciclo de vida de la planta son como mínimo 10 °C y máxima 35 °C, en estos umbrales, se garantiza el desarrollo de las diferentes fases fenológicas como la germinación y emergencia, crecimiento vegetativo, floración y fecundación, llenado de granos y madurez (Wijewardana *et al.* 2016).

Respecto a las necesidades hídricas del maíz, este cultivo requiere entre 500 y 800 mm de precipitación efectiva, para poder desarrollar todas sus etapas fenológicas y expresar su potencial pro-

ductivo (FAO 2002). Sobre esto Baffour-Ata *et al.* (2023) identificaron que la variación estacional y el cambio espacial sobre los patrones de lluvia, impulsan el rendimiento del maíz. En condiciones de sequía, la precipitación está por debajo del umbral de los requerimientos de agua del cultivo; por otro lado, el rendimiento aumenta continuamente con una mayor precipitación hasta que alcanza un umbral óptimo, después del cual, el suministro de agua supera las necesidades hídricas del cultivo y el exceso comienza a afectar negativamente el rendimiento (Li *et al.* 2019).

Recientemente se ha identificado para el territorio mexicano una anomalía en la temperatura media anual, en la que indica que hasta el año 2021 se observó un aumento en la temperatura promedio de 1.31 °C desde el año 1910 (PINCC 2023). En este mismo sentido, Méndez *et al.* (2008) identificó que durante el periodo 1920-2004, en México se presentó un incremento mayor de precipitación para las zonas áridas y semiáridas, observando un incremento de hasta 1.8% de la precipitación total anual, mientras que para las zonas húmedas solo se incrementó hasta 0.9%, en las estaciones que presentan una tendencia negativa se observan promedios de disminución de hasta 1.2% y la mayoría se localizan en las zonas más lluviosas del país. La detección de tendencias pasadas, los cambios y variabilidad en la serie temporal de temperatura y precipitación, permiten comprender el clima de una región y corroborar el impacto del cambio climático (Panda y Sahu 2019). Algunos estudios realizados para México, han empleado pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas para la evaluación de tendencias en series temporales hidrometeorológicas, que incluyen precipitaciones y temperaturas (Méndez *et al.* 2008, Velasco-Hernández *et al.* 2015, Rocha-Escalante *et al.* 2022).

Las observaciones a escala global del clima histórico o las proyecciones del clima futuro, representan una dificultad para la planificación a escala local o regional, por lo que se recomienda, la evaluación de tendencias históricas o proyecciones futuras a una escala mayor (Martínez *et al.* 2012, Sharma *et al.* 2016). Dentro de este contexto, el

objetivo de esta investigación fue analizar series de temperatura y precipitación mediante pruebas estadísticas, para identificar tendencias y patrones espaciales de estas variables, a nivel regional en el Distrito de Desarrollo Rural de Atlacomulco y dimensionar posibles impactos en la producción de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco (DDRA) se localiza en la región norte del Estado de México (Figura 1A), entre los paralelos 19° 25' y 20° 5' Latitud Norte, y 99° 30' y 100° 17' de Longitud Oeste. Comprende los municipios de Acambay, Atlacomulco, El Oro, Ixtlahuaca, Jocotitlán, Jiquipilco, Morelos, San Felipe del Progreso, San José del Rincón y Temascalcingo (SIAP 2023). El clima dominante es el templado sub-húmedo con lluvias en verano (CW) de acuerdo con la categorización realizada por Köppen, la temperatura promedio anual es de 13.4 °C, las temperaturas mínimas y máximas varían aproximadamente entre 5.1 °C y 21.7 °C respectivamente; de abril a junio se registran las temperaturas más elevadas; en diciembre y enero se reportan las temperaturas más frías (Figura 1C y D). La precipitación media anual es de 780 mm, y durante los meses de junio a septiembre ocurre la mayor precipitación acumulada como se observa en la figura 1B (INEGI 2020).

Datos observados

Este estudio examina las tendencias de temperatura máxima, mínima y precipitación, durante un periodo de observación de 33 años (1985-2017). Se utilizaron 30 estaciones meteorológicas distribuidas espacialmente en los diferentes municipios que conforman el DDRA, 23 estaciones corresponden al Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA 2023) y 7 al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP 2023) (Figura 1 y Tabla 1).

Los criterios de selección para cada estación meteorológica en el DDRA, se basaron en las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), dichas estaciones deben contener al

menos el 80% de datos disponibles para el periodo de análisis y no presentar valores faltantes por más de 3 años consecutivos (OMM 2013). Para maximizar la coherencia temporal en el conjunto de datos, Werner *et al.* (2019) recomiendan que las estaciones seleccionadas pueden tener hasta el 10% de días faltantes dentro de un año, por lo que, se filtraron las estaciones que no cumplieron dichas condiciones. Sin embargo, dado que las estaciones meteorológicas son escasas en algunas partes del DDRA, este criterio se omitió para aquellas estaciones que representan un vacío de información y que podrían comprometer el análisis espacial.

En México es difícil encontrar series completas de datos climáticos sin errores, anomalías y datos faltantes, por lo que, homogeneizar los registros meteorológicos es un proceso clave para muchos tipos de investigación climática (Guajardo-Panes *et al.* 2017). Por tal razón, se realizó un proceso de control de calidad y homogenización de datos mediante el paquete R CLIMATOL 3.1.1, siguiendo la metodología que se describe en Guijarro (2018). La aplicación de este programa, permitió resolver el problema de los datos faltantes, ya que los genera mediante un promedio ponderado de los cuatro valores observados más cercanos a la estación de referencia (Varotsos *et al.* 2023).

La investigación se realizó con promedios anuales, únicamente considerando los 8 meses correspondientes al ciclo agrícola de maíz, que inicia en abril y culmina en noviembre (Vázquez-Carrillo *et al.* 2020). El periodo se dividió en tres fracciones de tiempo, lo que hace posible evaluar los cambios temporales a menor escala, e identificar las ventanas de tiempo con mayores impactos (Kubiak-Wójcicka *et al.* 2023): 1985-1995 (primer periodo), 1996-2006 (segundo periodo) y 2007-2017 (tercer periodo).

Métodos de análisis

Test de Mann-Kendall

La prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall se ha utilizado comúnmente para evaluar la importancia de las tendencias en series temporales hidrometeorológicas (Mann 1945, Kendall 1975). Debido a su robustez y simplicidad, es apropiada para

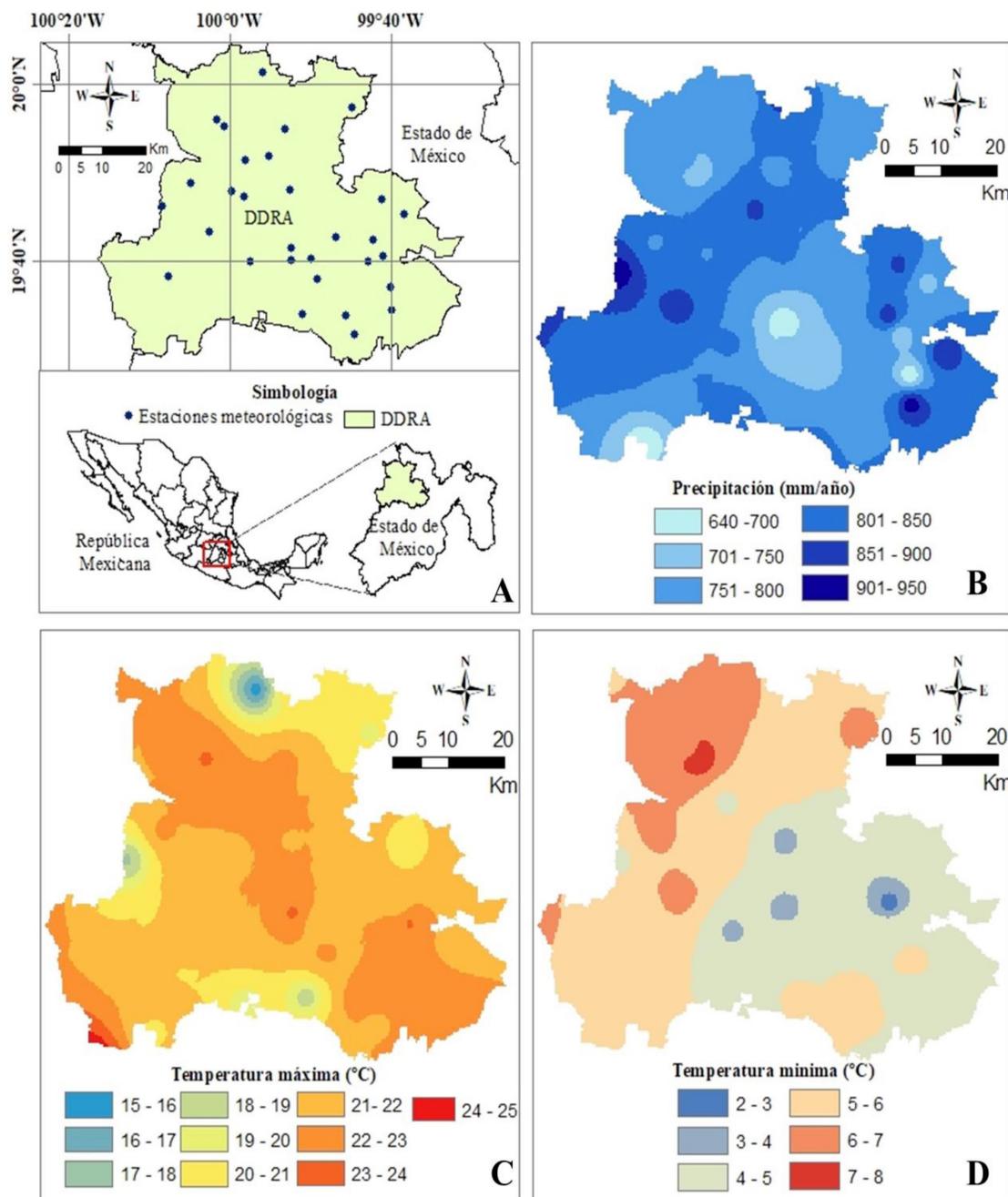


Figura 1. Ubicación geográfica del DDRA; A) Estaciones meteorológicas, B) Precipitación anual (mm), C) Temperatura máxima anual (°C) y D) Temperatura mínima anual (°C). Periodo 1985-2017.

examinar tendencias a largo plazo, sin asumir una distribución particular (Kubiak-Wójcicka *et al.* 2023). En este estudio se empleó Mann-Kendall para determinar la significancia estadística de las tendencias de precipitación y temperatura durante el ciclo agrícola,

basándose en la metodología propuesta por Yue *et al.* (2002), utilizando el software de acceso libre TREND V1.0.2. Esta prueba ha sido ampliamente aplicada para detectar la presencia de tendencias monótonas (crecientes o decrecientes), así como determinar el

Tabla 1. Estaciones meteorológicas ubicadas en el DDRA.

ID	Nombre	Municipio	Longitud	Latitud	Altura
15025	Ejido de Llano Grande	Jiquipilco	-99.665	19.572	2538
15026	Enyeje	Ixtlahuaca	-99.85	19.564	2550
15029	El Tejocote	Atzacmulco	-99.918	19.862	2449
15070	Presa Brockman	El Oro	-100.14	19.769	2929
15071	Presa El tigre	Morelos	-99.686	19.78	2710
15076	Presa Tepatitlán	San Felipe del Progreso	-99.958	19.663	2564
15085	San Bartolo del llano	Ixtlahuaca	-99.741	19.524	2587
15104	San Pedro Potla	Temascalcingo	-99.968	19.855	2450
15112	Santiago Yeche	Jocotitlán	-99.703	19.704	2696
15117	Temascalcingo	Temascalcingo	-100.012	19.92	2377
15128	Tultenango	El Oro	-100.081	19.812	2601
15158	San Pedro de los Baños	Ixtlahuaca	-99.831	19.669	2552
15239	San Antonio Trojes	Morelos	-99.64	19.753	2831
15244	Muyteje	Acambay	-99.931	20.022	2840
15245	La Jordana	El Oro	-99.995	19.796	2620
15251	Atzacmulco II	Atzacmulco	-99.874	19.798	2574
15264	Buenos aires	Jiquipilco	-99.668	19.616	2576
15267	Chichilpa	San Felipe del Progreso	-100.042	19.719	2795
15308	San Cristóbal de los Baños	Ixtlahuaca	-99.872	19.689	2570
15341	San Antonio Nixini	Jiquipilco	-99.683	19.673	2545
15361	Pozo ocho	Acambay	-99.746	19.956	2626
15372	Ixtlahuaca	Ixtlahuaca	-99.76	19.56	2540
15390	Jocotitlán	Jocotitlán	-99.78	19.71	2650
31	San José del Río	Ixtlahuaca	-99.818	19.631	2545
35	San José del Rincón	San José del Rincón	-100.125	19.634	2692
36	Santiago Casandeje	Jocotitlán	-99.970	19.786	2586
36728	La Concha	Ixtlahuaca	-99.872	19.666	2550
36756	Tiacaque	Jocotitlán	-99.713	19.663	2560
37673	La Laguna	Acambay	-99.8856	19.91531	2513
860124	El Jacal	Temascalcingo	-100.027	19.933	2379

nivel de significancia estadístico (Wu *et al.* 2016, Panda y Sahu 2019). La prueba estadística de Mann-Kendall (S) se expresa de la siguiente manera en la ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n_1-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

Donde n es la longitud de la serie de datos, x_j y x_k son los datos secuenciales en la serie y $\text{sgn}(x)$ es la función de signo, se define en la siguiente ecuación:

$$\text{donde : } \text{sgn}(x) \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

La varianza de S viene dada por la ecuación siguiente:

$$\text{Var}(S) \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_p t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \div 18$$

Dónde: t_p son los vínculos de la serie temporal de la muestra y n es el número de valores en la serie de datos analizados.

El estadístico de Mann-Kendall viene dado por el valor gaussiano estandarizado de Z, que se calcula de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

Los valores Z positivos indican tendencias crecientes, mientras que los negativos indican tendencias decrecientes. Se prueba la hipótesis nula H_0 sin tendencia contra la hipótesis alternativa H_1 , donde hay una tendencia monótona creciente o decreciente. La región de aceptación en el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, está determinada por el intervalo $-1.96 \leq Z \leq 1.96$ (sin tendencia significativa), mientras que la región de rechazo viene dada por $Z < -1.96$ (tenden-

cia significativa decreciente) y $Z > 1.96$ (tendencia significativa creciente) (García-Cueto *et al.* 2019, Krajewski *et al.* 2019, Wu *et al.* 2016).

Método de Regresión Lineal

El método de regresión es una prueba paramétrica y se emplea para analizar las tendencias lineales a largo plazo de variables climáticas en una serie temporal (Tian y Yang 2017, Martínez *et al.* 2012). Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$y = ax + b$$

Dónde: y es la variable dependiente (Temperatura en °C), a es la pendiente de una regresión lineal (°C año), x es la variable independiente (año), b es valor teórico de la variable dependiente en el año cero (primer año de observación). Con este método se permite establecer la magnitud de la tendencia significativa identificada (Krajewski *et al.* 2019).

RESULTADOS

Variabilidad de la precipitación y temperatura

Durante el periodo analizado (1985-2017) en el DDRA, la variabilidad de la precipitación se identifica sin tendencia significativa. Se encontró una pendiente (tasa de cambio) en la ecuación de regresión de $a = 1.9 \text{ mm año}^{-1}$ y una tendencia de $Z = 1.04$, lo que resulta en un incremento de 62.7 mm, un aumento notable de 8.5% con respecto a la media. Fue en el segundo periodo (1996-2006) en el que, se encontró una mayor variabilidad, con una tendencia y pendiente positiva de $Z = 1.09$ y $a = 10.7 \text{ mm año}^{-1}$ respectivamente como se observa en la figura 2A.

Para la temperatura máxima, durante el periodo analizado (1985-2017) se percibe una tendencia y pendiente positiva ($Z = 1.86$ y $a = 0.031 \text{ °C año}^{-1}$). Con esta última prueba se identifica un incremento de hasta 1.02 °C equivalente a un aumento de 4.7%. Los resultados indican que durante el segundo periodo (1996-2006), la temperatura máxima experimentó una tendencia significativa creciente, considerando que $Z = 1.97$ y $a = 0.14 \text{ °C año}^{-1}$ (Figura 2B).

Respecto al comportamiento de la temperatura mínima, la tendencia durante el periodo analizado (1985-2017) representa una variabilidad con $Z = 1.65$ y $a = 0.026 \text{ °C}$, alcanzando un acumulado de hasta 0.85 °C, lo que representa un aumento del 12.9% en comparación con el promedio (Figura 2C). Se constató que, durante el tercer periodo (2007-2017), ocurrió el incremento de mayor impacto en la serie de tiempo ($Z = 0.54$ y $a = 0.18 \text{ °C año}^{-1}$).

Análisis de tendencia por estación Precipitación

De acuerdo con las pruebas estadísticas empleadas, durante el periodo (1985-2017) (Figura 3A), el 77% del total de estaciones mostró una tendencia positiva, cuyo valor pendiente promedio fue de 3.3 mm año^{-1} , siendo el sureste del DDRA la zona con mayor impacto; por su parte, las pendientes negativas llegan a decrecer en promedio hasta -2.6 mm año^{-1} .

Durante el primer periodo 1985-1995 (Figura 3B), el 60% de las estaciones resultaron con una tendencia positiva que, en su mayoría, se localizan hacia el norte y noreste del DDRA, cuya pendiente promedio es de 9 mm año^{-1} , mientras que las pendientes negativas experimentaron un decremento promedio de -7.8 mm año^{-1} . En el segundo periodo (1996-2006) (Figura 3C), tan solo tres estaciones indican una tendencia significativa creciente y una estación con tendencia significativa decreciente. Adicionalmente, se identifican en la zona sureste, una importante agrupación de estaciones con tendencia y pendiente positiva, con un valor promedio de 21.3 mm año^{-1} .

Para el tercer periodo (2007-2017) (Figura 3D), se encontró que 14 estaciones tienen una tendencia negativa, con un valor de pendiente promedio de $-28.5 \text{ mm año}^{-1}$, de las cuales; cuatro indican tendencia significativa decreciente, mientras que para las estaciones con tendencia positiva (53%), se identificó una pendiente promedio de 17.1 mm año^{-1} . Este periodo se caracterizó por ser el más seco de la serie analizada.

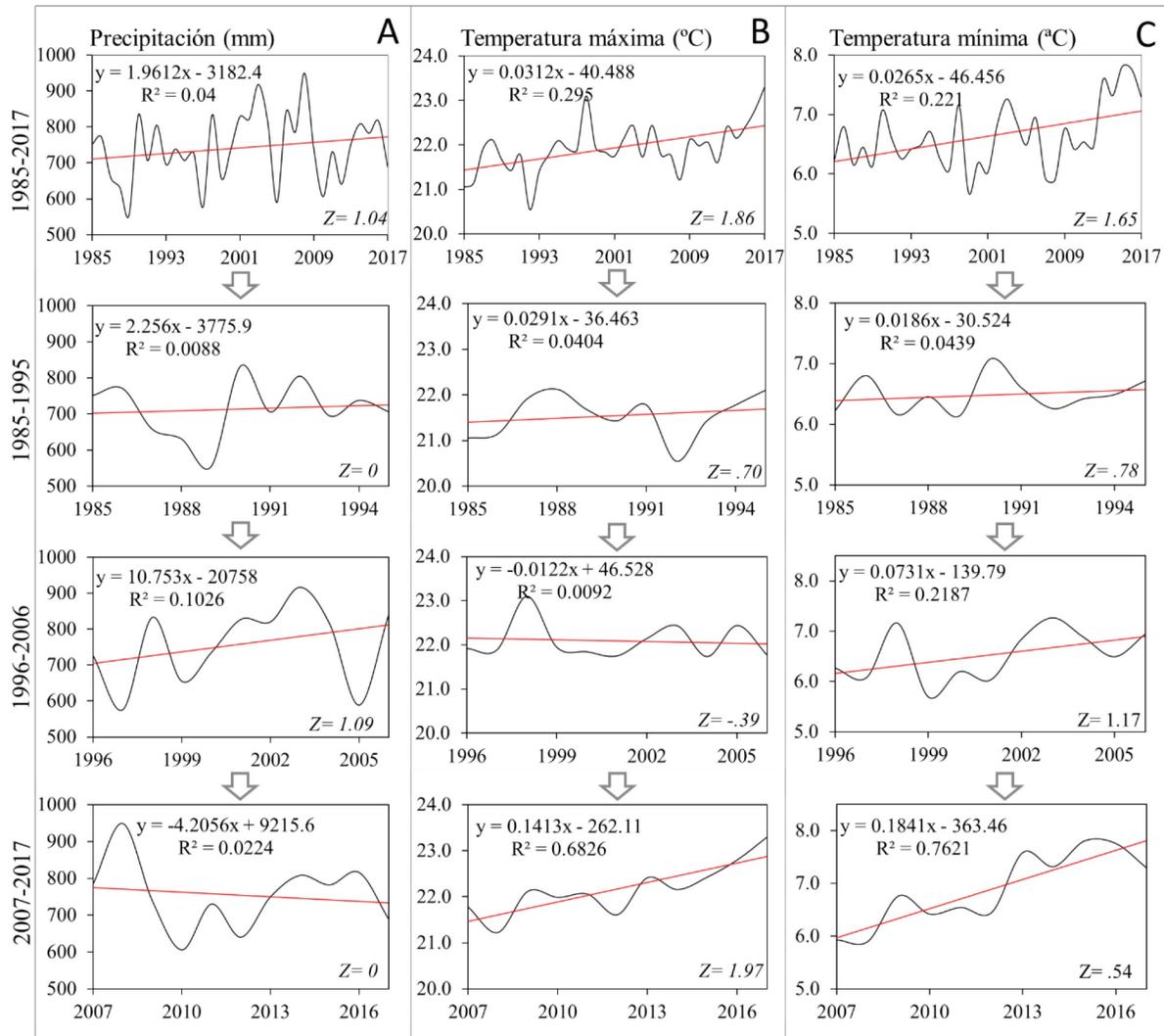


Figura 2. Tendencia promedio para el DDRA, método regresión lineal y prueba Mann-Kendall (Z); Precipitación (A), Temperatura máxima (B) y Temperatura mínima (C).

Temperatura máxima

En el análisis de la tendencia de temperatura máxima (Figura 4A) realizado durante el periodo 1985-2017, se puede observar que en el 76.7% del total de las estaciones, se ha registrado una tendencia positiva, cuya pendiente promedio es de $0.04 \text{ } ^\circ\text{C año}^{-1}$, de éstas, tres refieren a una tendencia significativa creciente, mientras que, para las tendencias negativas, resulto una pendiente promedio de $-0.03 \text{ } ^\circ\text{C año}^{-1}$. Hacia el periodo 1985-1995 (Figura 4B) el 43% de las estaciones, indican una tendencia nega-

tiva, las cuales promedian una pendiente de $-0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$, por el contrario, las estaciones que indican una tendencia positiva, reportan un incremento promedio de $0.09 \text{ } ^\circ\text{C año}^{-1}$.

En el periodo 1996-2006 (Figura 4C), se puede observar que el 60% de las estaciones corresponden a una tendencia negativa, cuya pendiente promedio indica ser de $-0.07 \text{ } ^\circ\text{C}$, en las que se incluyen dos estaciones con tendencia significativa decreciente, mientras que las pendientes positivas, se localizan agrupadas en el sureste del DDRA, promediando

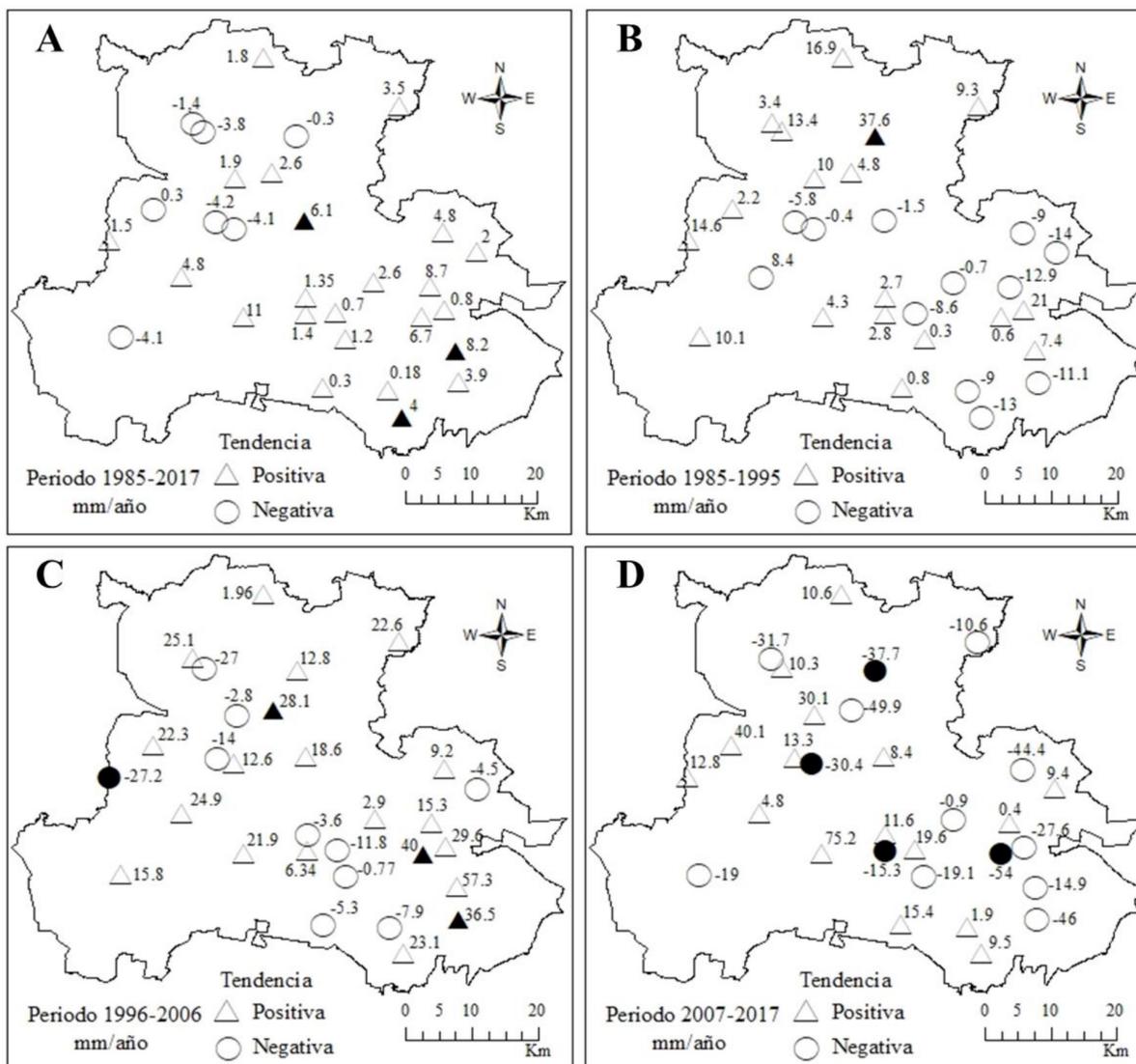


Figura 3. Tendencias en la precipitación usando las pruebas de Mann-Kendall y Regresión Lineal para: A) periodo 1985-2017, B) periodo 1985-1995, C) periodo 1996-2006 y D) periodo 2007-2017. Las tendencias significativas en $\alpha = 0.05$ están sombreadas en negro, los valores numéricos corresponden al valor de la pendiente expresados en $^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

una pendiente de $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ y finalmente hacia la última ventana de tiempo (2007-2017) (Figura 4D), los resultados permiten observar que el 60% de las estaciones, presentaron tendencias positivas, con una pendiente promedio de $0.28\text{ }^{\circ}\text{C año}^{-1}$, localizadas en su mayoría hacia el sur, mientras que las estaciones restantes (40%) presentan una tendencia negativa, con una pendiente de $-0.08\text{ }^{\circ}\text{C año}^{-1}$, localizadas en el sureste del DDRA.

Temperatura mínima

En la figura 5A se observa el periodo general (1985-2017), en el cual, resultaron 9 estaciones con tendencia significativa creciente y una estación con tendencia negativa decreciente. El 73% del total de estaciones, indican una tendencia positiva con una pendiente promedio de $0.04\text{ }^{\circ}\text{C año}^{-1}$, mientras que las pendientes negativas resultaron con una disminución promedio de $-0.03\text{ }^{\circ}\text{C año}^{-1}$. El análisis de las tendencias a largo plazo de la temperatura mínima

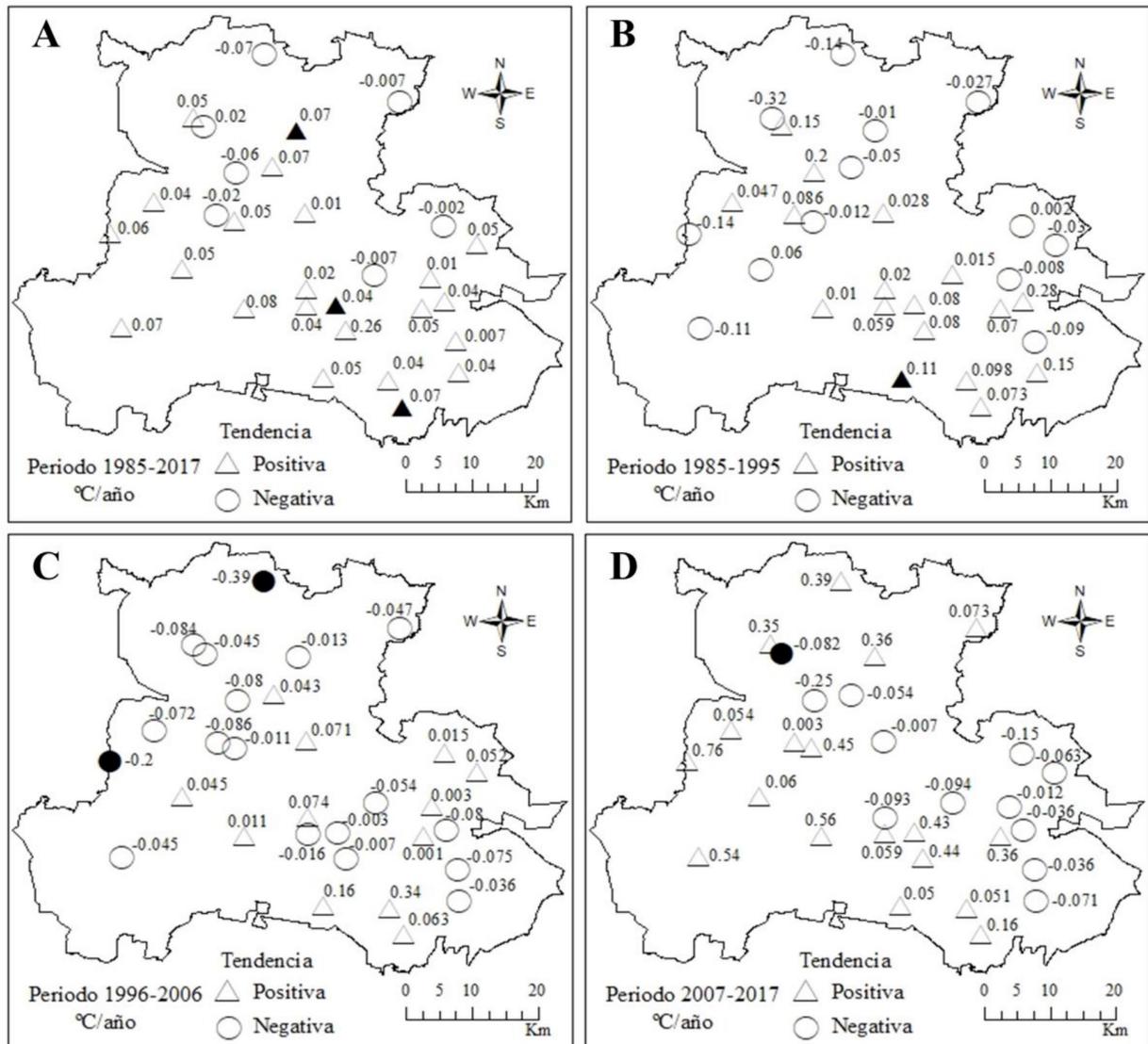


Figura 4. Tendencias en la temperatura máxima usando las pruebas de Mann-Kendall y Regresión Lineal para; A) periodo 1985-2017, B) periodo 1985-1995, C) periodo 1996-2006 y D) periodo 2007-2017. Las tendencias significativas en $\alpha = 0.05$ están sombreadas en negro, los valores numéricos corresponden al valor de la pendiente expresados en $^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

usando la prueba Mann-Kendall, mostró tendencias significativas crecientes en los tres periodos. Durante 1985-1995 (Figura 5B), el 70% de las estaciones indican una tendencia positiva, en las cuales, el promedio de incremento es de $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$, mientras que las estaciones con tendencia y pendiente negativa, se observan agrupadas en la parte central del DDRA. Hacia el periodo 1996-2006 (Figura 5C), los resultados indican que el 83% de las estaciones muestran

una tendencia y pendiente positiva cuyo promedio es de $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$, tan solo cinco estaciones indican una tendencia negativa, y se localizan agrupadas en la región sureste. En cuanto al periodo 2007-2017 (Figura 5D), sobresalen cinco estaciones con tendencia significativa creciente, el 90% de todas las estaciones indican una tendencia y pendiente positiva, cuyo promedio es de $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$.

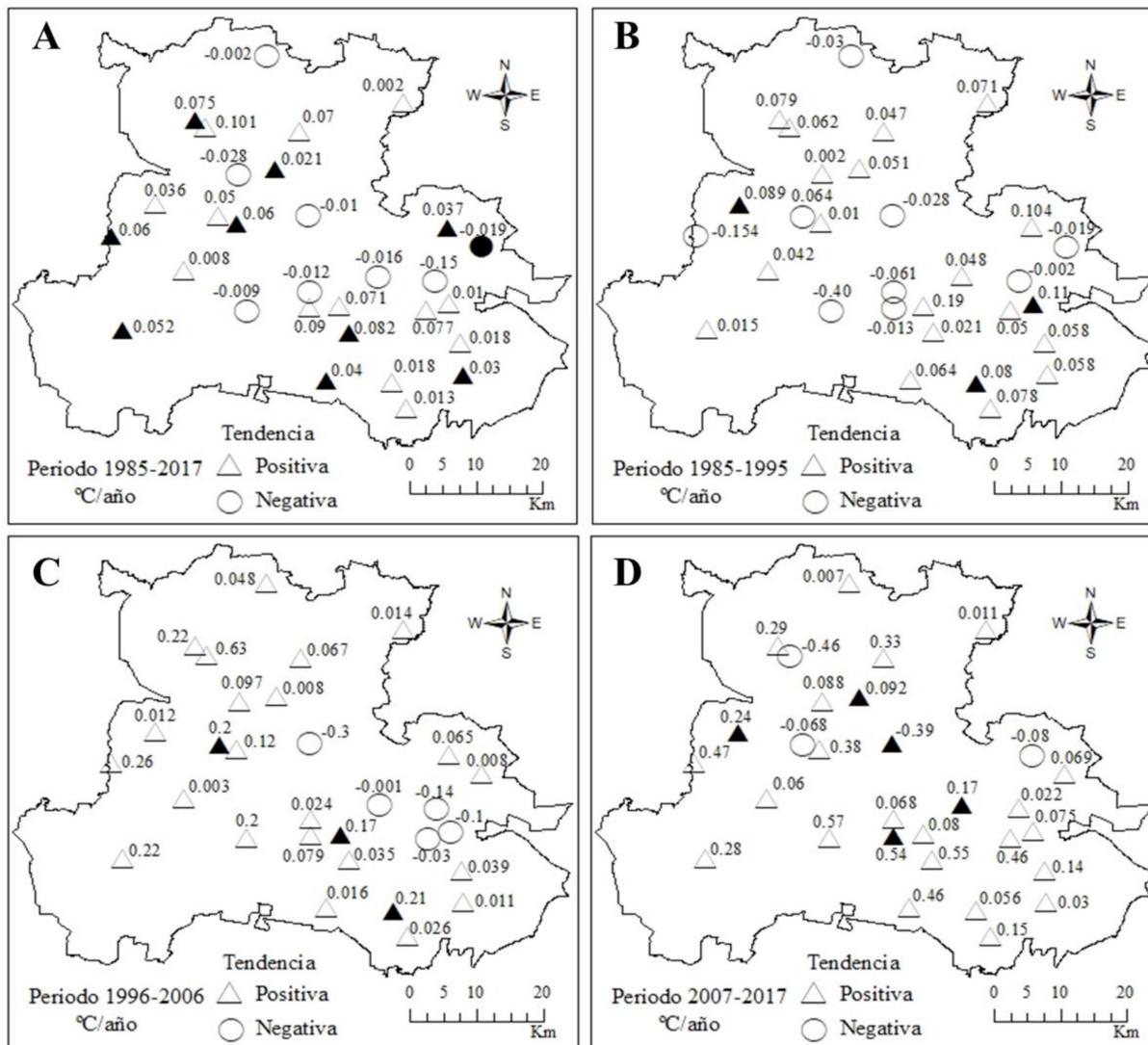


Figura 5. Tendencias en la temperatura mínima usando las pruebas de Mann-Kendall y Regresión Lineal para; A) periodo 1985-2017, B) periodo 1985-1995, C) periodo 1996-2006 y D) periodo 2007-2017. Las tendencias significativas en $\alpha = 0.05$ están sombreadas en negro, los valores numéricos corresponden al valor de la pendiente expresados en $^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

DISCUSIÓN

Variabilidad de la temperatura y precipitación

Los resultados indican que en un lapso de 33 años (1985-2017), el Distrito de Desarrollo Rural de Atlacomulco ha experimentado una variación sobre las características climáticas, del total de las estaciones meteorológicas estudiadas la mayoría presentan una tendencia a incrementar; 77% en precipitación (3.3 mm año^{-1}), 76.7% en temperatura máxima ($0.04 \text{ }^{\circ}\text{C año}^{-1}$) y 76% en temperatura

mínima ($0.04 \text{ }^{\circ}\text{C año}^{-1}$). Estos resultados concuerdan con diversos autores que han abordado esta temática en México. Al respecto, Méndez *et al.* (2008) analizaron la precipitación de México durante el periodo 1920-2004, en la cual, identifican que la lluvia se ha incrementado en las regiones áridas y semiáridas en 1.8% en promedio con respecto a la precipitación total anual y para las zonas húmedas hasta el 0.9%, mientras que la disminución se ha estimado hasta en 1.2% tanto en regiones secas como

húmedas, dándose a escalas locales. Por su parte, García-Cueto *et al.* (2019) estudiaron la tendencia a nivel nacional en 16 estaciones distribuidas en el país, durante el periodo 1980-2010, donde menciona que la temperatura máxima anual, muestra una tendencia creciente significativa en el 50% de las estaciones y una tendencia decreciente en el 18% de las estaciones, de igual manera, la temperatura mínima anual muestra una tendencia creciente significativa en el 69% de las estaciones y una tendencia decreciente en solo el 6% de las estaciones. Mientras que Rocha-Escalante *et al.* (2022) reportaron las tendencias de precipitación y temperatura en el Altiplano Potosino de México durante 1975-2015, encontrando estaciones con decrementos o incrementos para ambas variables en las tendencias anuales, se identifican grupos homogéneos en áreas locales. Por su parte, Velasco-Hernández *et al.* (2015) realizaron un estudio de tendencias climáticas para el centro de México, y reportan tendencias crecientes para temperatura y precipitación desde el periodo 1970-2012. Por otro lado, Martínez-Austria *et al.* (2014) identificaron el comportamiento de temperatura y precipitación en la cuenca baja del río Yaqui, donde se observó una tendencia clara de cambio climático en las temperaturas; en particular una disminución de la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas, mientras que para la precipitación anual, no se detectó una tendencia estadísticamente significativa.

Efectos causados por la precipitación

Los hallazgos encontrados en el DDRA, indican que puede haber efectos directos o indirectos considerables de las tendencias observadas de la precipitación y temperatura (máxima y mínima) sobre la producción de maíz, aunque no es el objetivo del estudio, estos se pueden pronosticar mediante casos de estudio reportados a nivel mundial. En la mayoría de las estaciones meteorológicas analizadas durante el periodo 1985-2017, la precipitación apunta hacia una tendencia a incrementar, lo cual es favorable a la producción de maíz, no obstante, en las estaciones que se presenta lo contrario (23%), se incide a una inminente escasez de agua viéndose afectada la disponibilidad de este recurso. La situación ante-

rior, conlleva a reducir el crecimiento y el rendimiento, que a menudo, son la causa principal de las pérdidas de cultivos (Baffour-Ata *et al.* 2023). Mientras que Villalobos-González *et al.* (2017) mencionan que en el cultivo de maíz a causa de la escasez de agua, se redujo la expansión del área foliar, se retrasó la antesis y floración femenina, disminuyó el rendimiento de grano y el número de granos en mazorca. Al respecto Çakir (2004) reporta que los déficits de agua durante el período de crecimiento vegetativo, causaron una pérdida del 28% al 32% del peso final de materia seca, así mismo se podrían esperar pérdidas mucho mayores del 66 al 93% como resultado del estrés hídrico prolongado durante la formación de espiga. En tanto que, Li *et al.* (2019) presentaron evidencia a partir de datos de rendimiento de cultivos durante el periodo 1981-2016, que las lluvias excesivas pueden reducir el rendimiento del maíz hasta -34% ($-17 \pm 3\%$ en promedio) en los Estados Unidos, comparable a la pérdida de hasta -37% por sequía extrema ($-32 \pm 2\%$ en promedio).

Efectos causados por la temperatura

La temperatura máxima y mínima, en más de la mitad de las estaciones del DDRA, presentan una tendencia hacia el incremento, las cuales tienen un impacto positivo durante de la temporada de crecimiento, favoreciendo fenología del maíz. Es probable que el aumento de temperatura media durante toda la temporada de cultivo, influya en la producción a través de factores como el aumento de la respiración, las pérdidas por evaporación, alto metabolismo basal y la alteración natural de las plantas al estrés biótico (Djalovic *et al.* 2023).

Se ha identificado que en el cultivo de maíz, el decremento de las temperaturas propicia a reducir su crecimiento vegetativo y desarrollo fenológico (Djalovic *et al.* 2023). Mientras que Waqas *et al.* (2021) y Wijewardana *et al.* (2016) han reportado, que cuando el cultivo de maíz está expuesto al estrés por frío, la tasa de crecimiento tiende a reducirse mientras que la duración del crecimiento se prolonga, por lo tanto, la baja temperatura debilita la plántula y también puede detener el llenado de grano prematuramente al final del ciclo de crecimiento, lo que resulta

en una baja producción de grano e inconsistente en los valles altos y templados como el caso del DDRA.

Investigaciones previas evaluaron la relación entre la variación climática y la producción de maíz en Estados Unidos durante el período 1982-1998; reportando una disminución del 17% en el rendimiento por cada 1 °C de incremento en la temperatura media (Wijewardana *et al.* 2016). Los efectos del aumento de las temperaturas han mostrado un alto grado de variación, con reducción del rendimiento del 5 a 8% con aumentos de temperatura de 2 °C, mientras que a temperaturas superiores a los 35 °C durante la etapa de polinización, disminuye la producción debido a la deshidratación del polen (Hatfield *et al.* 2011). Los estudios de campo en el maíz, han demostrado que se reducen los rendimientos del 13 al 88% debido al aumento de la temperatura a 6 °C por encima de las temperaturas óptimas (20 a 22 °C), una temperatura alta en las etapas críticas de desarrollo también puede deteriorar la calidad del grano (Ordóñez *et al.* 2015). Mientras que Hatfield *et al.* (2011) observaron una mayor tasa de fenología en temperaturas óptimas; sin embargo, el mayor efecto sobre la productividad se atribuyó al aumento de las temperaturas mínimas durante el período de llenado de grano.

CONCLUSIONES

El conocimiento sobre la distribución espacio-temporal y la variabilidad de la precipitación y la temperatura, es importante en la planificación y gestión agrícola. Las tendencias en la precipitación, temperatura máxima y mínima en el DDRA, identifican una tendencia creciente en todo el DDRA, pero al analizar cada estación de manera independiente, se puede observar un comportamiento heterogéneo. No se logró identificar una área o región específica con mayores o menores impactos, ya que la variabilidad espacial no presenta un patrón definido entre las variables estudiadas. La variabilidad y el cambio climático han provocado incrementos en la temperatura y precipitación en el DDRA, ante este escenario, se presentan condiciones óptimas para toda la temporada de crecimiento y desarrollo del maíz, con un clima con un mejor ambiente para potencializar el rendimiento. Del 2007-2017, la precipitación promedio anual, ha disminuido hasta en 4.2 mm año⁻¹, trayendo patrones de lluvia erráticos, lo que afecta de forma negativa el rendimiento del maíz, especialmente en temporal. De continuar esta tendencia, se provocarán efectos severos sobre la producción de maíz, lo que supone una amenaza para la seguridad alimentaria de la región.

LITERATURA CITADA

- Baffour-Ata F, Tabi JS, Sangber-Dery A, Etu-Mantey EE, Asamoah DK (2023) Effect of rainfall and temperature variability on maize yield in the Asante Akim North District, Ghana. *Current Research in Environmental Sustainability* 5: 100222. DOI: 10.1016/j.crsust.2023.100222.
- Çakir R (2004) Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research* 89(1): 1-16. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.01.005.
- CONAGUA (2023) Normales climatológicas por estado - <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>. Fecha de consulta: 05 de octubre de 2023.
- Djalovic I, Kundu S, Bahuguna RN, Pareek A, Raza A, Singla-Pareek SL, Prasad PV, Varshney RK (2023) Maize and heat stress: Physiological, genetic, and molecular insights. *Plant Genome* July: 1-19. DOI: 10.1002/tpg2.20378.
- Estrada F, Mendoza-Ponce A, Calderón-Bustamante O, Botzen W (2022) Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change* 22(4): 126. DOI: 10.1007/s10113-022-01986-0.

- FAO (2002) Agricultura mundial: hacia los años 2015-2030. <https://www.fao.org/3/y3557s/y3557s00.htm>. Fecha de consulta: 29 de mayo de 2023.
- García-Cueto OR, Santillán-Soto N, López-Velázquez E, Reyes-López J, Cruz-Sotelo S, Ojeda-Benítez S (2019) Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology* 137: 775-790.
- Guajardo-Panes RA, Granados-Ramírez GR, Sánchez-Cohen I, Díaz-Padilla G, Barbosa-Moreno F (2017) Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: Caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8(5): 157-177.
- Guijarro JA (2018) Homogeneización de series climáticas con Climatol. Versión 3.1.1. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/12185/1/homog_climatol-es.pdf. Fecha de consulta: 29 de mayo de 2023.
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde R.C, Ort D, Thomson AM, Wolfe D (2011) Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal* 103: 351-370.
- INEGI (2020) Estado de México: Territorio. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/default.aspx?tema=me&e=15>. Fecha de consulta: 21 de mayo de 2023.
- INIFAP (2023) Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. <https://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/DatosIndirectos/NEssenger>. Fecha de consulta: 05 de octubre de 2023.
- Kendall MG (1975) Rank correlation methods, 4th ed. Charles Griffin. London. 202p.
- Krajewski A, Sikorska-Senoner AE, Ranzi R, Banasik K (2019) Long-term changes of hydrological variables in a small Lowland watershed in Central Poland. *Water (Switzerland)* 11: 3. DOI: 10.3390/w11030564.
- Kubiak-Wójcicka K, Nagy P, Pilarska A, Zeleňáková M (2023) Trend analysis of selected hydroclimatic variables for the hornad catchment (Slovakia). *Water* 15(3): 1-18. DOI: 10.3390/w15030471.
- Li Y, Guan K, Schnitkey GD, DeLucia E, Peng B (2019) Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States. *Global Change Biology* 25: 2325-2337.
- Mann HB (1945) Nonparametric test against trend. *Econometrics* 13: 245-259.
- Martinez CJ, Maleski JJ, Miller MF (2012) Trends in precipitation and temperature in Florida, USA. *Journal of Hydrology* 452-453: 259-281.
- Martínez-Austria P, Patiño-Gómez C, Tamayo-Escobar JE (2014) Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6: 135-149.
- Méndez J, De Jesús J, González V (2008) Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas* 65: 38-55.
- Ordóñez RA, Savin R, Cossani CM, Slafer GA (2015) Yield response to heat stress as affected by nitrogen availability in maize. *Field Crops Research* 183: 184-203.
- OMM (2013) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Organización Meteorológica Mundial. N° 8. <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>. Fecha de consulta: 30 de mayo de 2023.
- Panda A, Sahu N (2019) Trend analysis of seasonal rainfall and temperature pattern in Kalahandi, Bolangir and Koraput districts of Odisha, India. *Atmospheric Science Letters* 20: 1-10. DOI: 10.1002/asl.932.

- PINCC (2023) 2021 fue el cuarto año más caluroso en México del que se tenga registro. Programa de Investigación en Cambio Climático UNAM. <https://www.pincc.unam.mx/2021-fue-el-cuarto-ano-mas-caluroso-en-mexico-del-que-se-tenga-registro/>. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2023.
- Rocha-Escalante H, Jaimes-Arredondo A, Cardona-Benavides A, Rodríguez-Cuevas C, Giácoman-Vallejos G, Aceves-De Alba J, García-Arreola M E, Cisneros-Almazán R (2022) Rainfall and temperature trends in the Altiplano Potosino Region, Mexico (1975-2015). *Tecnología y Ciencias del Agua* 13: 75-126.
- Sánchez B, Rasmussen A, Porter JR (2014) Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology* 20: 408-417.
- Sharma CS, Panda SN, Pradhan RP, Singh A, Kawamura A (2016) Precipitation and temperature changes in eastern India by multiple trend detection methods. *Atmospheric Research* 180: 211-225.
- SIAP (2023) Avance de Siembras y Cosechas Resumen por estado. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do. Fecha de consulta: 25 de junio de 2023.
- Tian Q, Yang S (2017) Regional climatic response to global warming: Trends in temperature and precipitation in the Yellow, Yangtze and Pearl River basins since the 1950s. *Quaternary International* 440: 1-11. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.02.066.
- Varotsos KV, Dandou A, Papangelis G, Roukounakis N, Kitsara G, Tombrou M, Giannakopoulos Ch (2023) Using a new local high resolution daily gridded dataset for Attica to statistically downscale climate projections. *Climate Dynamics* 60: 2931-2956.
- Vázquez-Carrillo MG, Martínez-Gutiérrez A, Zamudio-González B, Espinosa-Calderón A, Tadeo-Robledo M, Turrent-Fernández A (2020) Estabilidad de rendimiento y características fisicoquímicas de grano de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11: 1803-1814.
- Velasco-Hernández M, Morales-Acoltzi T, Estrella-Chulim N, Díaz-Ramos R, Juárez-Sánchez JP, Hernández-Vázquez M, Bernal-Morales R (2015) Trends and variability of climate change indices: agricultural focus, in two regions of Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1587-1599.
- Villalobos-González A, López-Castañeda C, Miranda-Colín S, Aguilar-Rincón VH, López-Hernández MB (2017) Relaciones hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización nitrogenada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 1651-1665.
- Waqas MA, Wang X, Zafar SA, Noor MA, Hussain HA, Azher M, Farooq M (2021) Thermal stresses in maize: Effects and management strategies. *Plants* 10(2): 1-23. DOI: 10.3390/plants10020293.
- Werner AT, Schnorbus MA, Shrestha RR, Cannon AJ, Zwiers FW, Dayon G, Anslow F (2019) A long-term, temporally consistent, gridded daily meteorological dataset for northwestern North America. *Scientific Data* 6: 1-16. DOI: 10.1038/sdata.2018.299.
- Wijewardana C, Brien-Henry W, Hock MW, Raja-Reddy K (2016) Growth and physiological trait variation among corn hybrids for cold tolerance. *Canadian Journal of Plant Science* 96: 639-656.
- Wu Y, Wang W, Wang G (2016) Detecting variation trends of temperature and precipitation for the Dadu River Basin, China. *Advances in Meteorology* 2016: 1-11. DOI: 10.1155/2016/2564586.
- Yue S, Pilon P, Cavadias G (2002) Erratum: Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology* 259: 254-271.