

Impacto del cambio climático en el período de crecimiento del maíz en el oriente de Puebla, México

Impacto das mudanças climáticas na estação de cultivo de milho
no Leste de Puebla, México

Impact of climate change on maize growing season
in Eastern Puebla, Mexico

Rogelio Bernal-Morales¹, José Pedro Juárez-Sánchez¹, Benito Valverde-Ramírez¹,
Ignacio Ocampo-Fletes¹ y María de los Ángeles Velasco-Hernández²

¹ Colegio de Postgraduados. Campus Puebla, Santiago Momoxpan, municipio de San Pedro Cholula

² Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Instituto de Ciencias, Ciudad Universitaria
Puebla, estado de Puebla, México

bernal.rogelio@colpos.mx; pjuarez@colpos.mx; bramirez@colpos.mx; ocampoif@colpos.mx;
angeles.velasco@correo.buap.mx

Bernal: <https://orcid.org/0000-0001-5370-4157>

Juárez: <https://orcid.org/0000-0001-8417-1752>

Valverde: <https://orcid.org/0000-0003-2482-5667>

Ocampo: <https://orcid.org/0000-0001-6311-1072>

Velasco: <https://orcid.org/0000-0002-8301-789X>

Resumen

El cambio climático está afectando el rendimiento de los cultivos de temporal. El objetivo de la investigación fue identificar el impacto del cambio climático en la distribución espacial del periodo de crecimiento del cultivo de maíz de temporal. Para ello se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_o), analizando datos de 13 estaciones climatológicas para el periodo base (1961-1990) y 10 para el periodo más reciente (1991-2020). Los resultados indican que hay una mayor variabilidad en la duración del periodo de crecimiento en el periodo más reciente y existe un impacto diferenciado en la distribución espacial del periodo de crecimiento, ya que hay lugares donde habrá un aumento y en otros se presenta una disminución. Se concluye que en la duración del periodo de crecimiento los productores deben optar por semillas de ciclos más cortos, para evitar las primeras heladas que se esperan a finales de septiembre y/o principios de octubre.

PALABRAS CLAVE: adaptación; planeación agrícola; variabilidad climática.

Resumo

As alterações climáticas estão afetando o rendimento das culturas de sequeiro. O objetivo da pesquisa foi identificar o impacto das mudanças climáticas na distribuição espacial do período de crescimento do milho de sequeiro. Para isso, foi calculada a evapotranspiração de referência (ET_o), analisando dados de 13 estações climatológicas do período base (1961-1990) e 10 do período mais recente (1991-2020). Os resultados indicam que existe maior variabilidade na duração do período de crescimento no período recente e há um impacto diferenciado na distribuição espacial do período de crescimento, pois há locais onde haverá aumento e em outros haverá uma diminuição. Conclui-se que na duração do período vegetativo os produtores devem optar por sementes com ciclos mais curtos, para evitar as primeiras geadas que são esperadas no final de setembro e/ou início de outubro.

PALAVRAS-CHAVE: adaptação; planejamento agrícola; variabilidade climática.

Abstract

Climate change is affecting the yield of rainfed crops. The objective of the research was to identify the impact of climate change on the spatial distribution of the growth period of rainfed corn. To do this reference evapotranspiration (ET_o) was calculated, analyzing data from 13 weather stations for the base period (1961-1990) and 10 for the most recent period (1991-2020). The results indicate that there is greater variability in the length of the growth period in the recent period and there is a differentiated impact on the spatial distribution of the growth period since there are places where there will be an increase and in others there is a decrease. It is concluded that in the length of the growth period, producers should opt for seeds with shorter cycles, to avoid the first frosts expected at the end of September and/or beginning of October.

KEYWORDS: adaptation; agricultural planning; climate variability..

1. Introducción

Para el año 2050 se proyecta que la población mundial será de 9.300 millones de habitantes y para alimentarlos se deberá aumentar la producción de alimentos de los 8.400 a casi 13.500 millones de toneladas [Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2015]. En este contexto, el maíz adquiere gran importancia al superar en volumen de producción al trigo y al arroz. En América Latina y el Caribe, el arroz, trigo, maíz, frijol y soya son importantes debido a sus aportes a la economía y a la seguridad alimentaria (Rodríguez *et al.*, 2016). En México, en el ciclo 'Primavera-Verano 2023' se sembraron 7.395.540 ha de cultivos de temporal, siendo el maíz con mayor superficie representando el 66%, seguido del frijol con el 11% y la avena forrajera en verde con el 5% [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2024]. En México se produjeron 26.625.694 t de maíz en 2022 colocándose como el octavo productor mundial [Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAOSTAT), 2024].

En 2023, los principales estados productores en el ciclo 'Primavera-Verano' fueron Jalisco, Estado de México, Guerrero, Chiapas, Michoacán y Puebla, concentrando el 73% de la producción nacional. El estado de Puebla ocupó el sexto lugar con un volumen de producción de 868.939 t. Con relación al rendimiento, el estado de Jalisco ocupó el primer lugar con 6,46 t ha⁻¹, seguido de Nayarit y Morelos con 4,1 y 4,01 t ha⁻¹, respectivamente, mientras que Puebla ocupó el lugar 15 con 1,92 t ha⁻¹ (SIAP, 2024). La superficie sembrada explica la importancia de este cultivo en la alimentación de la población del país y se confirma a través de su consumo *per cápita* anual de 335,2 kg (SIAP, 2024a).

La población del estado de Puebla asciende a 6.583.278 [Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2021] y requiere 2.206.714 t para cubrir las necesidades básicas de alimentación. Con la producción de 900.442 t de maíz de temporal más las 239.371 t de riego en el 2023, solo se estaría cubriendo el 51,6% de la

demanda, por lo que existe un déficit de 1.066.901 t, ante ello, se deben diseñar estrategias enfocadas a incrementar la producción en aproximadamente un 93,6% para cubrir este déficit.

Por otra parte, las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por las actividades antropogénicas han contribuido a incrementar la variabilidad climática en las diferentes escalas temporales y espaciales. Es por lo que en las últimas décadas se han modificado los patrones de temperatura y distribución de la precipitación, además, se han incrementado los eventos climáticos extremos, todo ello tiene que ver con lo que se conoce como cambio climático. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IPCC, 2018: 75) lo define como el "*cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables*".

En cambio, la variabilidad climática denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (eventos extremos, desviaciones estándar, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales (IPCC, 2018). En este contexto, las predicciones climáticas indican un mundo más cálido en los próximos 50 años; el IPCC (2014) menciona que un incremento de 2°C en la temperatura afectará el rendimiento de los principales cultivos. También su impacto se observa con una posible reducción de las áreas con aptitud para el establecimiento de cultivos y en su periodo de crecimiento que está asociado con la disminución del número de días con humedad disponible (Monterroso *et al.*, 2015). Se puede decir que el cambio climático impacta directamente en la producción de los diferentes cultivos dependientes de la lluvia y se considera que este tipo de agricultura es uno de los sectores más vulnerables ante el cambio climático.

Lo anterior se confirma con las proyecciones que indican que los rendimientos de la

agricultura de temporal se reducirán significativamente (Ureta *et al.*, 2020). En este sentido, Estrada *et al.* (2022) cuantificaron los efectos del cambio climático en los rendimientos de seis cultivos relevantes, encontrando que estos podrían disminuir un 42% bajo un escenario de altas emisiones para el cultivo de maíz de temporal. Por su parte, Arce-Romero *et al.* (2020) indican que una disminución en la cantidad y distribución de la precipitación podría disminuir el rendimiento de maíz en climas cálidos y secos hasta un 84% respecto al escenario base de acuerdo con los escenarios más severos.

Se afirma que el cambio climático ejerce una influencia negativa en la agricultura de temporal, por lo que la temperatura y precipitación impactan el rendimiento del maíz; el comprender esta dinámica es trascendental para desarrollar estrategias tecnológicas sostenibles que puedan mitigar los efectos adversos del cambio climático en la producción de maíz (Bendáková *et al.*, 2024). Se considera que este cultivo está condicionado fundamentalmente por la precipitación y la temperatura, las proyecciones indican una disminución en la precipitación y un incremento en la temperatura, esto condiciona el periodo de crecimiento de los cultivos de temporal. Así, los productores enfrentan desafíos al momento de planificar el proceso agrícola, ya que en años recientes debido a la alta variabilidad climática/cambio climático se enfrentan a una mayor incertidumbre sobre cuándo y qué tipo de variedad sembrar, debido a que el conocimiento y evaluación del clima es de suma importancia para la planificación agrícola (Granados-Ramírez *et al.*, 2011).

Los impactos del cambio climático en México se han abordado desde cuatro perspectivas: a) cambio en los periodos de crecimiento, b) requerimientos de agua, c) cambio en la distribución potencial y, d) en el rendimiento de los cultivos (Monterroso *et al.*, 2015). En este sentido, Wang *et al.* (2011) indican que el periodo de crecimiento se reducirá en la parte central y occidental de la provincia de Jilin en China, lo que conducirá a un periodo de llenado de grano más corto. Además, se proyecta que el rendimiento

promedio de maíz en las regiones occidental y central disminuirá un 15% o más para 2050, según lo previsto por el 90% de los 120 escenarios proyectados. Žydelis *et al.* (2021) mencionan que el cambio climático traerá condiciones más cálidas y húmedas y eventos extremos más frecuentes en la zona climática de Nemoral. Esto indica que la temperatura, la suma de los grados día de crecimiento y la cantidad de precipitación durante el periodo de crecimiento del maíz aumentarán, especialmente en escenarios de emisiones medias y altas (*Representative Concentration Pathways*-RCP4,5 y RCP8,5), con efectos positivos en los rendimientos. Por su parte, Achli *et al.* (2022) argumentan que el cambio climático tiene efectos adversos en el rendimiento de los cultivos en África y en el mundo. En Marruecos, el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones están teniendo consecuencias abrumadoras en los cultivos, ante esto, evaluaron la vulnerabilidad de la cebada, maíz y trigo a las variaciones en las precipitaciones en la temporada de crecimiento, encontrando que el maíz presentó la mayor vulnerabilidad y menor capacidad de adaptación.

Por su parte, Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz (2021) investigaron el impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial (ETP) y periodo de crecimiento en México, debido a que son indicadores esenciales en el proceso agrícola. Analizaron 28 escenarios de cambio climático, esperando que la ETP aumente prácticamente en todo el territorio nacional como consecuencia del incremento generalizado de la temperatura y la disminución de la humedad relativa. Encontraron que los estados de Baja California Sur, Coahuila y San Luis Potosí no sufrirán cambios respecto a las condiciones actuales. En los demás estados se reducirá el periodo de crecimiento debido a una combinación de cambio en el inicio y el final del periodo de crecimiento.

De manera específica, Montiel-González *et al.* (2019) a través de un análisis agroclimático en el estado de Michoacán, considerando la longitud del periodo de crecimiento por zonas bioclimáticas, lo que permitió identificar las zonas

con 6, 5, 4 y 3 meses de lluvia continua, por lo que propusieron el establecimiento de cultivos de temporal por zonas con potenciales climáticos que cubran los requerimientos de los cultivos. Este análisis es de utilidad para enfrentar el cambio climático mediante la sustitución de los cultivos en las zonas que requieren meses de lluvia agrícola continua. Es por ello que Monterroso *et al.* (2015) mencionan que la agricultura es uno de los sectores más vulnerables ante el cambio climático, al evaluar sus efectos en ella, mostró una posible reducción en las áreas potenciales, disminución en el periodo de crecimiento y en el rendimiento de los cultivos de maíz, frijol, trigo y café.

Es por lo que se afirma que la agricultura de temporal es vulnerable a las variaciones climáticas como las sequías, las inundaciones y las heladas y que sus efectos en el rendimiento del maíz de temporal serían negativos, al reducirse el periodo de crecimiento, especialmente en la etapa de llenado de grano (Conde *et al.*, 2000). Zarazúa *et al.* (2011) mencionan que el impacto del cambio climático sobre los parámetros agroclimáticos y fenológicos del cultivo de maíz, indican que habrá condiciones térmicas más extremas, y que el periodo de crecimiento se verá afectado, ya que habrá una disminución de este. En este sentido, Ruiz-Corral *et al.* (2016) al evaluar el impacto del cambio climático sobre la estación de crecimiento en el estado de Jalisco, México, encontraron que existen diferencias interregionales para la fecha de inicio, fecha de finalización y duración de la estación de crecimiento. Esta se reducirá entre 1 y 21 días en 2050 y de 1 a 35 días en 2070, con respecto a la climatología de referencia (1961-2010).

En este contexto, Christiansen *et al.* (2011) afirman que comprender los efectos del impacto del cambio climático sobre la estación de crecimiento es importante; para esto modelaron cambios futuros en la duración de la estación de crecimiento en 14 cuencas en 11 estados. Hallaron que aumentó la duración de la estación de crecimiento anual en las 14 cuencas, con un promedio de 27 a 47 días para los tres escenarios. Con relación a investigaciones que consideraron la zona de estudio, Granados-Ramírez *et al.* (2011) estimaron la duración e inicio de la estación de crecimiento y encontraron que las duraciones del periodo de crecimiento van desde 60-90, 90-120, 120-150 y 150-180 considerando el periodo 1961-2003. Por su parte, Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz (2021) mencionan que en el estado de Puebla se reducirá el periodo de crecimiento, debido a una combinación de cambio en el inicio y el final del periodo de crecimiento. Con base en lo anterior el objetivo de la investigación fue identificar el impacto del cambio climático en la distribución espacial de la duración del periodo de crecimiento del cultivo de maíz de temporal en la región Centro Oriente de Puebla, México. Se planteó como hipótesis que con cambio climático se espera que haya un cambio en la duración del periodo de crecimiento del maíz de temporal.

2. Área de estudio y metodología El área es el Centro Oriente del estado de Puebla se ubica entre los 18° 37' 30" y 19° 20' 29" de latitud norte y los 97° 12' 01" y 97° 48' 35" de longitud oeste y comprende 11 municipios: Mazapiltepec de Juárez, Soltepec, San Salvador el Seco, San Nicolás Buenos Aires, Aljojuca, San Juan Atenco, Tlachichuca, Chalchicomula de Sesma, Atzitzintla, Esperanza y Cañada Morelos (FIGURA 1).

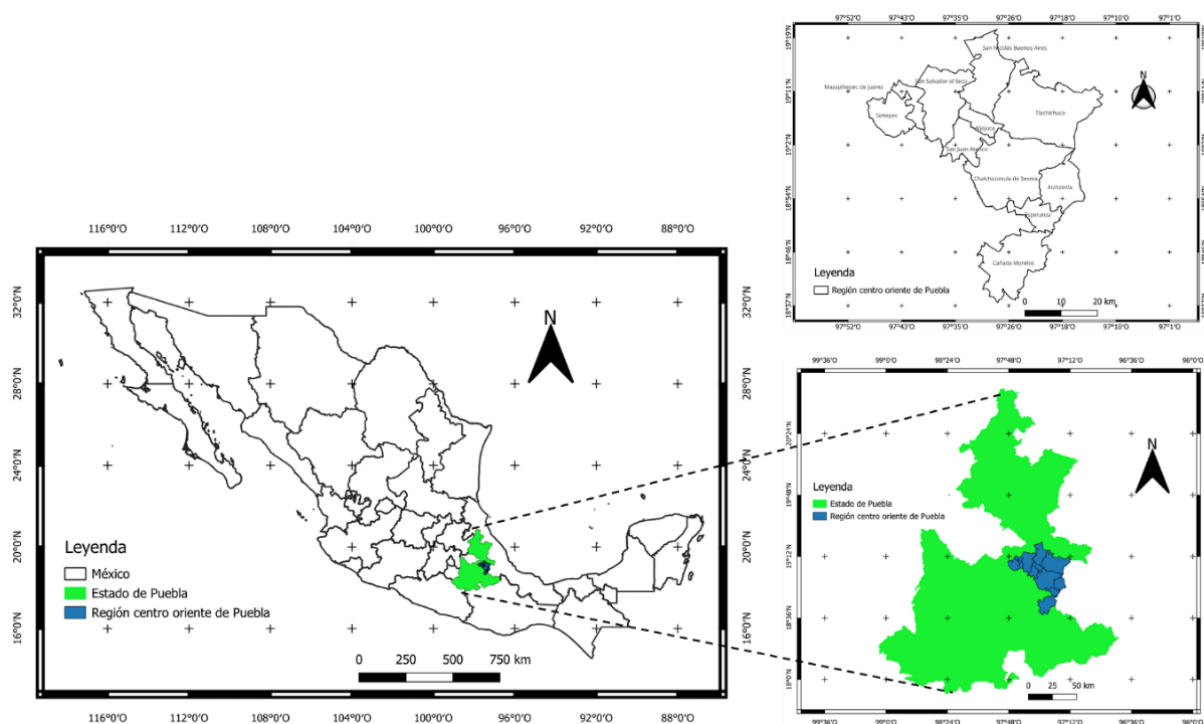


FIGURA 1. Región Centro Oriente de Puebla. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2024)

El área está conformada por llanuras, lomeríos y sierras, con altitudes que van de los 1.800 a los 3.200 m; la presencia de heladas es frecuente e inesperada, regularmente el periodo abarca de septiembre a marzo, con un promedio de 90 días; la temporada de lluvias se presenta de marzo a septiembre; la precipitación fluctúa desde los 390 a 1.200 mm anuales, mientras que el promedio en la región es de 590 mm (Juárez-Sánchez y Ramírez-Valverde, 2006). El tipo de suelo más abundante es el Regosol Ócrico con 55,5%, seguido por el Andosol Ócrico 21,1% y en proporciones menores están los Ferozem y Rendzina (Velázquez *et al*, 2019). Con relación a la evapotranspiración, la zona centro y sureste presentan valores de 600 mm, mientras que la norte y sur valores de 400 a 500 mm (INEGI, 2004).

En 2023, la superficie sembrada con maíz de temporal representó el 87,8% (SIAP, 2024); económicamente, la producción de este cultivo representó el 90,3% del total del valor de la

producción. En la FIGURA 2 se presenta el porcentaje que corresponde a la superficie sembrada de maíz de temporal para cada uno de los municipios; se aprecia la importancia que tiene este cultivo, ya que el porcentaje más bajo se presenta en San Juan Atenco (78%), mientras que en Cañada Morelos (96%) el más alto.

En la identificación del periodo de crecimiento se utilizaron datos diarios de precipitación (PCP), temperatura máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}) de las estaciones climatológicas del periodo 1961-2020 [Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2024]. Se aplicó el software *RClimDex* para analizar la calidad de datos, lo cual permitió seleccionar las estaciones climatológicas con menos de 20% de datos faltantes y por lo menos 10 años en el periodo evaluado. Después de realizar el análisis de calidad de datos se seleccionaron 13 estaciones climatológicas para el periodo 1961-1990 y 10 estaciones climatológicas en el periodo 1991-2020 (FIGURA 3).

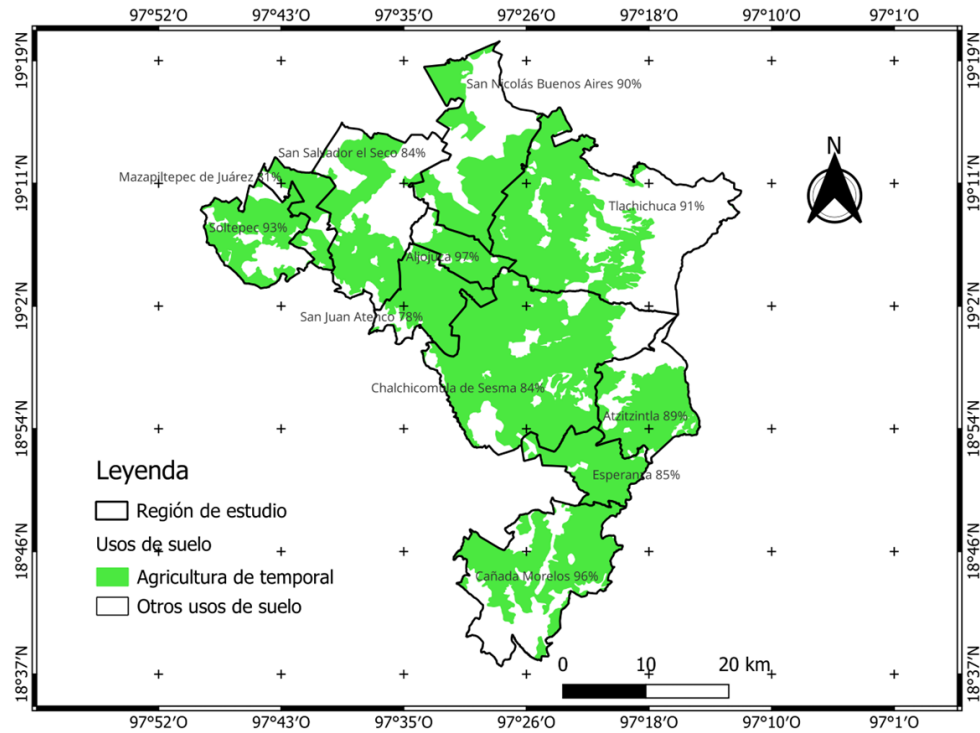


FIGURA 2. Porcentaje de hectáreas del cultivo de maíz de temporal. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2024) y SIAP (2024)

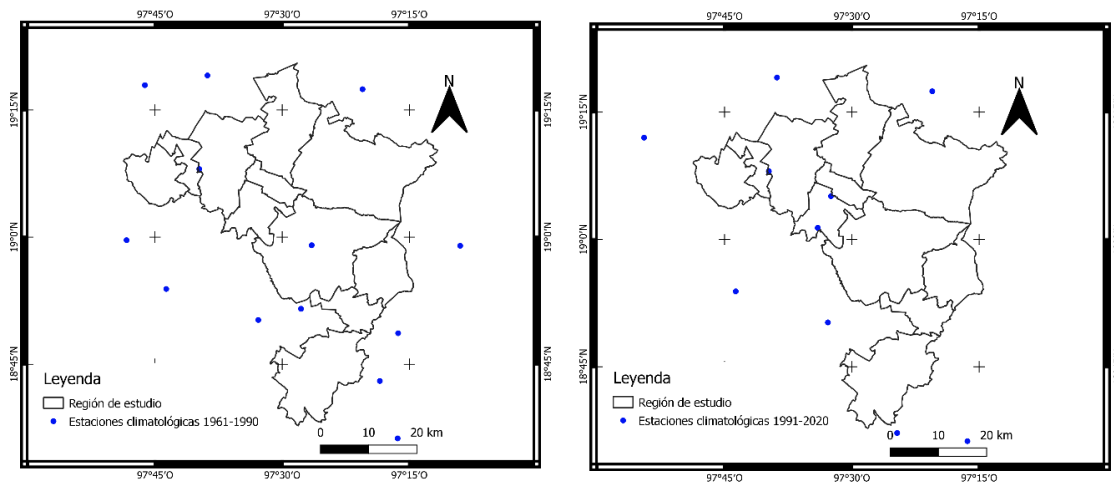


FIGURA 3. Estaciones climatológicas 1961-1990 (lado izquierdo) y estaciones climatológicas 1991-2020 (lado derecho). Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2024) y SMN (2024)

Se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_o) con el método de *Penman-Monteith* recomendado por la Organización de las

Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2006) con la ecuación (1):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia
(mm día⁻¹)

R_n: radiación neta en la superficie del cultivo
(MJ m⁻² día⁻¹)

G: flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T: temperatura media del aire a 2 m de altura
(°C)

u₂: velocidad del viento a 2 m de altura
(m s⁻¹)

e_s: presión de vapor a saturación
(kPa)

e_a: presión actual de vapor (kPa)

(e_s - e_a): déficit de presión de vapor (kPa)

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor
(kPa °C⁻¹)

γ: constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

Para el cálculo de la ETo se requiere de datos diarios de la T_{máx} y T_{mín}, la presión real de vapor (e_a), la radiación neta (R_n) y la velocidad del viento medida a 2 m (u₂). Cuando no se dispone de alguno de los datos climáticos requeridos se

recomienda la estimación de estos. Por ello se estimaron los datos faltantes de humedad asumiendo que la temperatura del punto de rocío es similar a la temperatura mínima diaria con la ecuación (2):

$$e_a = e^0(T_{\min}) = 0,611 \exp \left[\frac{17,27 T_{\min}}{T_{\min} + 237,3} \right] \quad (2)$$

Donde:

e_a = presión de vapor real

e⁰ = presión de saturación de vapor

T_{mín} = temperatura mínima

Se estimó la radiación solar derivada de las diferencias térmicas, es decir, la diferencia entre T_{máx} y T_{mín}, la cual se puede utilizar como

indicador de la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra. Para esto se utilizó la ecuación (3):

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min}) R_a} \quad (3)$$

Donde:

R_s = radiación solar [MJm⁻² d⁻¹]

R_a = radiación extraterrestre [MJm⁻² d⁻¹]

T_{máx} = temperatura máxima (°C)

T_{mín} = temperatura mínima (°C)

k_{R_s} = coeficiente de ajuste (0,16..0,19)

Los coeficientes de ajuste, k_{R_s} , son empíricos y se diferencian para zonas del 'interior' y las regiones 'costeras'. Para las primeras, en donde la masa de tierra domina y las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande del agua, $k_{R_s} \approx 0,16$. Para las localizaciones 'costeras', situadas en la costa o cerca de una masa grande de tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano, $k_{R_s} \approx 0,19$. En caso de no tener disponibilidad de datos de viento dentro de la misma región, un valor de 2 m s^{-1} se utilizó como estimación temporal. Este valor es el promedio de 2.000 estaciones meteorológicas en todo el mundo.

La FAO (1997) menciona que el periodo de crecimiento (PC) es el número de días, durante un año, en el que las condiciones de humedad y temperatura son favorables para el desarrollo de los cultivos. El inicio del PC se considera cuando la $PCP \geq 0,5 \text{ ETo}$, esto implica que la cantidad de agua es suficiente para la germinación de las semillas de los cultivos. En el PC puede o no haber un periodo húmedo, el cual es el intervalo donde la $PCP > \text{ETo}$. Cuando existe un periodo húmedo se satisfacen las demandas de evapotranspiración de los cultivos y el déficit de humedad en el perfil del suelo. El PC termina cuando la $PCP \leq 0,5 \text{ ETo}$, aunque la finalización del PC generalmente excede un número de días requeridos para evapotranspirar hasta 100 mm (Pájaro y Ortiz, 1992).

El período comprendido entre los años 1961 y 1990 se ha mantenido como período de referencia reglamentario para las evaluaciones de cambio climático a largo plazo (OMM, 2017), por lo que al compararlo con el periodo 1991-2020 se puede identificar si hay cambio climático en la región de estudio.

Para cada estación climatológica seleccionada se calculó a escala pentadal, la PCP, $T_{\text{máx}}$, $T_{\text{mín}}$ y la Evapotranspiración de referencia (ETo), las pentadas (cada cinco días) son acumuladas para la PCP y ETo , mientras que para la $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$ son valores promedios. Una vez que se estimó el

periodo de crecimiento para cada una de las estaciones climatológicas, se utilizó el sistema de información geográfica QGIS para interpolar la información mediante el método de la Distancia Inversa Ponderada; en este método de interpolación, los puntos de muestra se ponderan durante la interpolación de modo que la influencia de un punto con relación a otro disminuye con la distancia desde el punto desconocido que desea crear. La ponderación es asignada a los puntos de muestreo mediante la utilización de un coeficiente de ponderación que controla cómo la influencia de la ponderación decae mientras la distancia hacia el punto nuevo se incrementa. Mientras más grande sea el coeficiente de ponderación menor será el efecto que los puntos tendrán si están lejos del punto desconocido durante el proceso de interpolación. Conforme el coeficiente se incrementa, el valor de los puntos desconocidos se aproxima al valor del punto de observación más cercano (QGIS, 2023).

3. Resultados

El análisis de los datos indica un cambio en la duración del periodo de crecimiento al comparar el periodo más reciente (1991-2020) con el periodo base (1961-1990). En el periodo base en Chalchicomula de Sesma se presentaron las mayores duraciones que van de 150 a 165 días, seguido de los municipios de Soltepec, Mazapiltepec de Juárez, San Salvador el Seco, Aljojuca, San Juan Atenco, la zona centro-sur de San Nicolás Buenos Aires. En la zona centro-sur de Tlachichuca, Atzitzintla y Esperanza sus duraciones que van de los 139 a los 150 días. Por su parte, en la zona centro-norte de San Nicolás Buenos Aires y la zona norte de Tlachichuca las duraciones van de los 129 a los 139 días, el municipio con la menor duración del periodo del crecimiento fue Cañada Morelos que va de los 114 a los 139 días (FIGURA 4); estos resultados coinciden con la investigación de Granados-Ramírez *et al.* (2011) que indican que duraciones del periodo de crecimiento van desde los 90-120, 120-150 y 150-180 días.

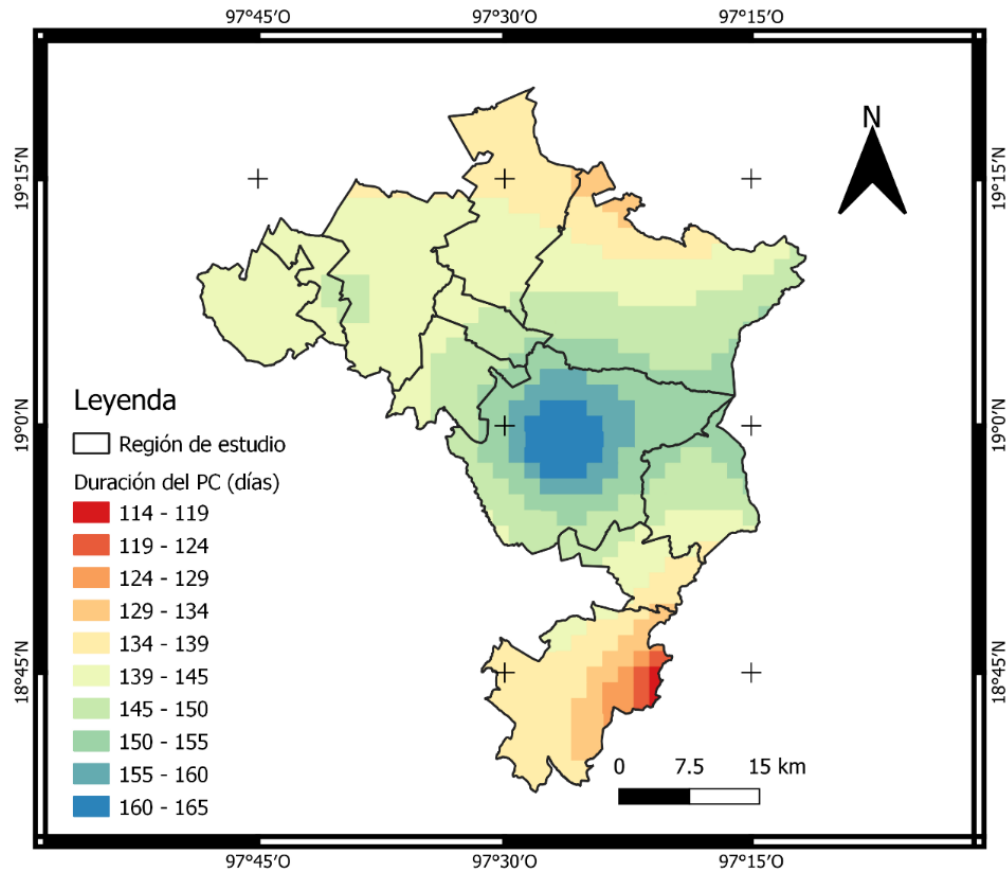


FIGURA 4. Periodo de crecimiento 1961-1990. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2024) y resultados de la investigación

El periodo de crecimiento más reciente (1991-2020) tuvo la mayor duración en San Juan Atenco que va de los 149 a 160 días, seguido de Aljojuca con 149 a 155 días; a su vez, Soltepec, Mazapiltepec de Juárez, la zona centro-sur de San Salvador el Seco, el sur de San Nicolás Buenos Aires, la zona oeste de Tlachichuca y el centro-norte de Chalchicomula de Sesma presentaron una duración que va de los 138 a 149 días. Por otra parte, la zona norte de San Salvador

el Seco, el centro-norte de San Nicolás Buenos Aires, el centro-este de Tlachichuca, Atzitzintla, Esperanza y la zona centro-sur de Chalchicomula de Sesma la duración del periodo de crecimiento fue de los 128 a 138 días. Mientras que la menor duración del periodo de crecimiento se siguió presentando en Cañada Morelos que va de los 106 a los 128 días (FIGURA 5).

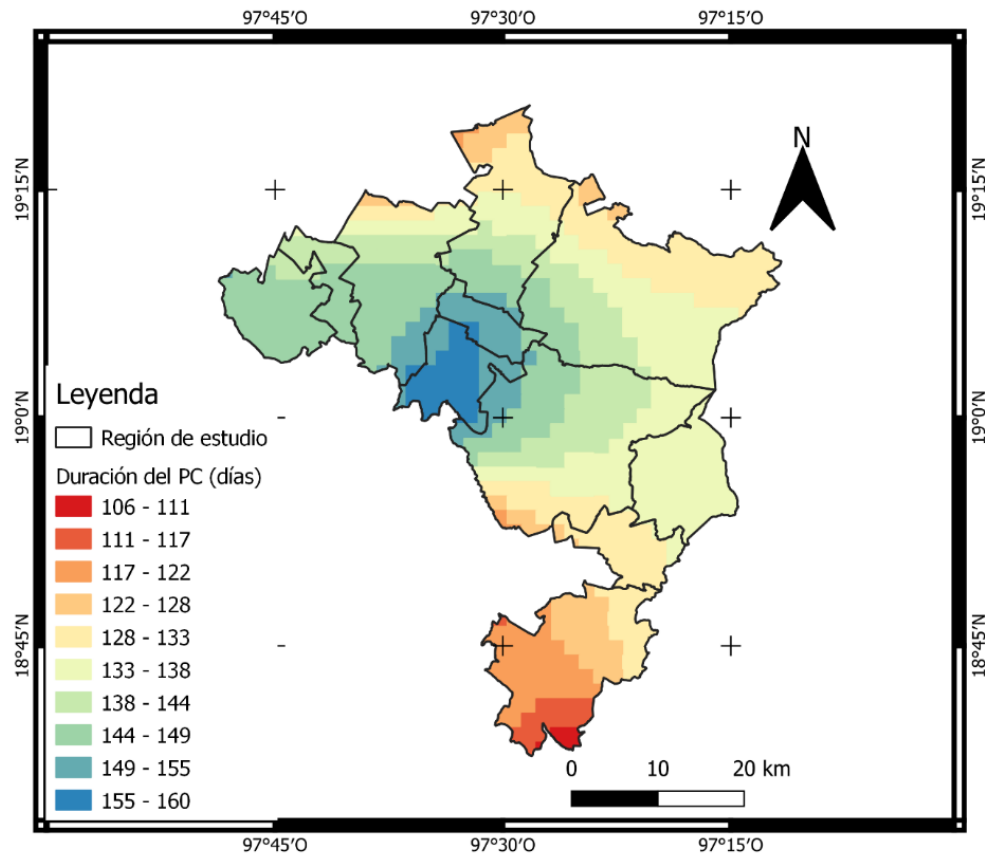


FIGURA 5. Periodo de crecimiento 1991-2020. Fuente: elaboración propia de INEGI (2024) y resultados de la investigación

Los cambios en donde se ha reflejado una disminución en la duración del periodo de crecimiento del periodo 1991-2020 con respecto al periodo base 1961-1990 se debe a que en promedio las lluvias se presentaron de forma tardía, lo que ocasionó que haya un corrimiento en el establecimiento del inicio de lluvias, aunado a una disminución de la precipitación de marzo a septiembre y a un aumento en la temperatura máxima que se vio reflejado en una mayor evapotranspiración diaria, y por lo tanto, se requieren más días para tener la humedad necesaria para el inicio del periodo de crecimiento, lo cual coincide con Monterroso *et al.* (2015) que mencionan que la disminución del periodo de crecimiento está asociado a la baja del número de días con humedad disponible. En este sentido, Ruiz-Corral *et al.* (2000) argumentan que hay una tendencia a disminuir el periodo de

crecimiento y que es importante incrementar esfuerzos en el desarrollo de variedades con mayor precocidad. Por otra parte, Ballesteros-Barrera *et al.* (2011) indican que habrá una reducción de las condiciones climáticas idóneas para el establecimiento del cultivo de maíz.

En este contexto, Ruiz-Corral *et al.* (2011) mencionan que habrá un incremento en la temperatura y una disminución en la precipitación, lo que producirá balances hídricos menos favorables para el cultivo, lo que acortará su ciclo de madurez. Por su parte, Montilla-Pacheco *et al.* (2024) encontraron que la disminución del rendimiento en las cosechas está asociado a una disminución en el ciclo de desarrollo del cultivo.

En el municipio de Chalchicomula de Sesma, con información de la estación climatológica 20126 Ciudad Serdán del periodo 1991-2020, se

registró, en los meses de marzo a septiembre, una disminución en la precipitación de 81,5 mm y se incrementó la temperatura máxima promedio 1,7 °C, lo que ha ocasionado que haya una mayor evapotranspiración promedio pasando de 4,8 a 5,1 mm diarios, lo cual coincide con Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz (2021) que se espera que la evapotranspiración aumente

como consecuencia del incremento de la temperatura y la disminución de la humedad relativa. Por lo que se requieren más días para tener las condiciones propicias para establecer el inicio del periodo de crecimiento, lo que originó que haya disminuido el periodo de crecimiento en promedio 20 días en esta región (FIGURA 6).

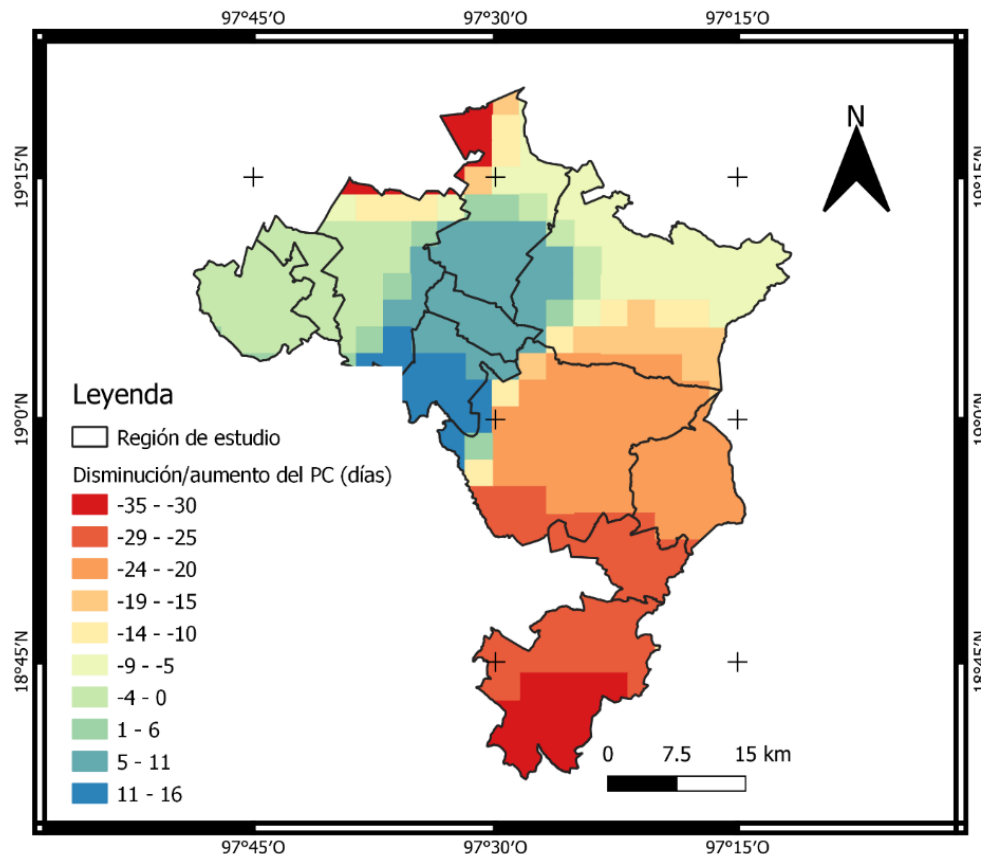


FIGURA 6. Comparación del periodo de crecimiento del periodo 1991-2020 con respecto al periodo base 1961-1990. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2024) y resultados de la investigación

Se destaca que los mayores aumentos en la duración del periodo de crecimiento fueron en los municipios de San Juan Atenco y la zona sureste de San Salvador el Seco, que fueron de 5 a 16 días, seguidos de Aljojuca, el centro-sur de San Nicolás Buenos Aires, el oeste de Tlachichuca estos rondaron de los 5 a los 11 días, mientras que las mayores disminuciones en la duración del periodo de crecimiento se presentaron en los municipios de Cañada Morelos, Atzitzintla, el sur

de Chalchicomula de Sesma y la zona noroeste de San Nicolás Buenos Aires con valores que oscilaron entre los 25 y 35 días, seguido de los municipios de Esperanza, Chalchicomula de Sesma y la zona sur de Tlachichuca, que rondaron de los 20 a 24 días; por su parte, en la zona centro-norte de Tlachichuca y San Nicolás Buenos Aires se presentaron disminuciones que fueron de los 10 a los 19 días.

En Soltepec y Mazapiltepec de Juárez se mostraron las menores disminuciones (de 0 a 4 días). Se encontró que en la zona centro-norte de Tlachichuca y centro-este de San Nicolás Buenos Aires hay una baja que va desde los 5 a los 9 días, y se considera que estas disminuciones en la duración del periodo de crecimiento coinciden con la investigación de Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz (2021) quienes señalan que en el estado de Puebla, el periodo de crecimiento se reducirá, debido a una combinación de cambio en el inicio y el final de este. Por su parte, Wang *et al.* (2011) indican que el periodo de crecimiento se reducirá. En este sentido, Zarazúa *et al.* (2011) señalan que habrá condiciones térmicas más extremas, y que el periodo de crecimiento disminuirá. Por otra parte, Ruiz-Corral *et al.* (2016) afirman que existen diferencias para la fecha de inicio, fecha de finalización y duración del periodo de crecimiento. En este contexto, este impacto diferenciado en la duración del periodo de crecimiento en la región centro oriente de Puebla coinciden con la investigación de Peng *et al.*

(2024) que encontraron que la duración ha aumentado en el norte y ha disminuido en el sur. Se considera que estos resultados permitirán tomar decisiones sobre el tipo de variedad ciclo corto, mediano o largo plazo se debería sembrar en cada uno de los municipios.

Con relación a la variabilidad en la duración del periodo de crecimiento de ambos periodos, se encontró que en el periodo 1961-1990 se presentó una 'menor variabilidad', lo que hacía que los productores tuvieran en promedio la misma cantidad de días disponibles en el periodo de crecimiento, lo que permitía sembrar de forma sistemática la misma variedad de maíz. Mientras que en el periodo 1991-2020 se presenta una 'mayor variabilidad' (FIGURA 7), lo que significa un gran problema para los productores, los cuales en su mayoría tienen que esperar a que se establezcan las condiciones propicias de humedad para iniciar el ciclo agrícola y determinar el tipo de variedad de semilla ciclo (corto, mediano o largo plazo) que deben utilizar en la siembra para obtener mejores rendimientos.

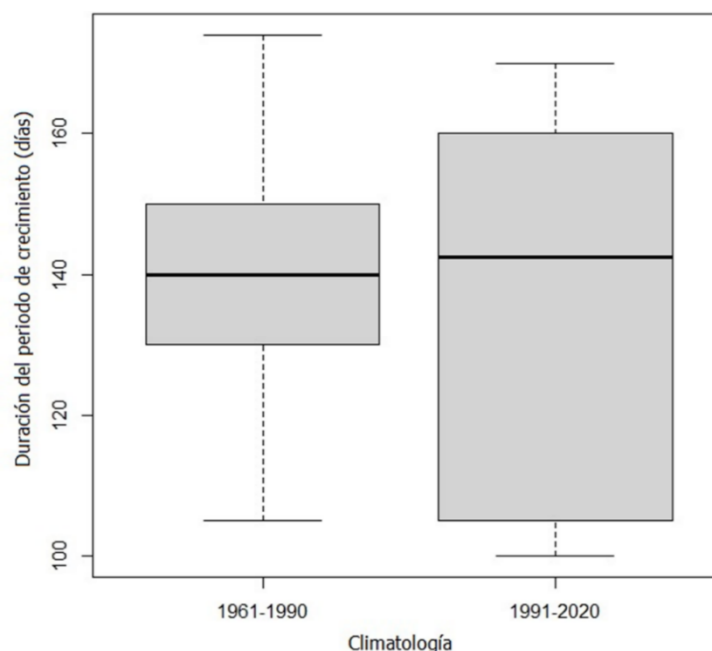


FIGURA 7. Variabilidad del periodo de crecimiento en el periodo base (1961-1990) versus más reciente (1991-2020). Fuente: elaboración propia con resultados de la investigación

En el periodo base las condiciones propicias de humedad para iniciar el periodo de crecimiento se presentaron primero en la zona centro de Chalchicomula de Sesma, extendiéndose al norte de San Juan Atenco, Aljojuca, al centro-sur de Tlachichuca y el norte de Atzitzintla. Posteriormente, en Soltepec, Mazapiltepec de Juárez, San Salvador el Seco, la zona centro-norte de Tlachichuca, y por último se establecieron en el sur en Atzitzintla, Esperanza, Cañada Morelos y centro-norte de San Nicolás Buenos Aires y norte de Tlachichuca.

En el periodo reciente, las condiciones propicias de humedad para comenzar el periodo de crecimiento se observó un desplazamiento hacia la zona noroeste, iniciando en San Juan Atenco y Aljojuca, extendiéndose a los municipios de Sultepec, Mazapiltepec, el centro-sur de San Salvador el Seco, el centro-sur de San Nicolás Buenos Aires, el oeste de Tlachichuca y la zona noroeste de Chalchicomula de Sesma. Posteriormente, se establecieron las condiciones propicias de humedad en el norte de San Salvador el Seco y San Nicolás Buenos Aires, en el noreste de Tlachichuca, Atzitzintla y Esperanza, para establecerse por último en Cañada Morelos y en la zona norte de San Nicolás Buenos Aires.

Los resultados de la investigación son importantes en la toma de decisión, ya que se pasó de datos a información, con su análisis se generó conocimiento, y con este se pueden tomar decisiones en beneficio de los productores, dependiendo de cada una de las zonas identificadas, o si fuera el caso, sugerir un cambio de cultivo que se adapte mejor a las condiciones climáticas de la región, lo cual coincide con las recomendaciones de Montiel-González *et al.* (2019) de que se puede proponer el establecimiento de cultivos de temporal por zonas que cubran los requerimientos de los cultivos y en algunos casos proponer una reconversión productiva.

4. Discusión de los resultados

La precipitación y la temperatura son fundamentales para estimar la evapotranspiración, la cual es una variable importante en la determinación del inicio del

periodo de crecimiento, ya que cuando la precipitación es mayor o igual a 0,5 de la evapotranspiración se tiene la humedad necesaria para el inicio del periodo de crecimiento, los cambios en las duraciones del periodo de crecimiento se deben a que en las zonas con la mayor duración se establecen primero las condiciones climáticas para el inicio del periodo de crecimiento y conforme se van estableciendo en la región estas van cambiando. Los principales resultados indican que de manera general hay una disminución del periodo de crecimiento en la región centro oriente del estado de Puebla, lo que implica recomendar variedades de maíz de ciclo corto. En este sentido, Wanga *et al.* (2016) indican que el calentamiento climático disminuye los periodos de crecimiento del maíz. Por su parte, Moradi *et al.* (2014) mencionan que la adaptación es un factor clave para reducir la vulnerabilidad de los cultivos ante el cambio climático, ante esto evaluaron el efecto del cambio climático en tres tipos de variedad ciclo corto, intermedia y largo plazo, y concluyen que el maíz de ciclo corto puede considerarse como una adaptación efectiva.

Por otra parte, en el periodo más reciente 1991-2020 hay una mayor variabilidad en la duración del periodo de crecimiento, lo que nos indica que ya se están visualizando los impactos del cambio climático en la región de estudio. En este contexto, Mueller *et al.* (2015) argumentan que el cambio climático tiene un fuerte impacto en la duración del periodo de crecimiento. Sin embargo, en algunas regiones y con un cambio climático más exacerbado, las altas temperaturas pueden ser ya, o llegar a ser un factor limitante para el rendimiento de los cultivos.

El conocer cómo afecta el cambio climático el cultivo de maíz es primordial para planificar las actividades agrícolas. Li y Tian (2024) indican que se deben analizar los efectos del cambio climático en el entorno de cultivo del maíz, incluidos los cambios de temperatura, los cambios en la distribución de la precipitación y el impacto de los extremos climáticos. Ante esto, la investigación contribuye con la identificación del tipo de variedad de ciclo corto, mediano o largo

plazo que se debería utilizar en el inicio del proceso agrícola. Aunado a esto, también es trascendental realizar ajustes en las prácticas agrícolas para que el cultivo de maíz pueda aprovechar las condiciones climáticas actuales. En este sentido, Li y Tian (2024) mencionan que, en respuesta a los cambios en la distribución de precipitación, es fundamental fortalecer la retención de humedad del suelo y aumentar la capacidad de retención de agua del suelo.

5. Conclusiones

Se identificó una mayor variabilidad en la duración del periodo de crecimiento en el periodo más reciente (1991-2020) en comparación con el de referencia (1961-1990), lo que implica que los productores tengan que utilizar variedades de maíz de diferentes ciclos de desarrollo, ya sea, corto, mediano o largo plazo; por ello, en su mayoría tienen que esperar a que se establezcan las condiciones propicias de temperatura y humedad para iniciar el ciclo

agrícola para garantizar un buen rendimiento. También se identificó un impacto diferenciado del cambio climático en la distribución espacial de la duración del periodo de crecimiento del cultivo de maíz de temporal, en el periodo 1991-2020 la mayor duración del periodo de crecimiento se ha recorrido hacia el noroeste, San Juan Atenco y Aljojuca, mientras que la menor duración del periodo de crecimiento se sigue presentándose en la zona sur de la región de estudio, Cañada Morelos.

Este cambio en la duración del periodo de crecimiento hace que los productores tengan que optar por semillas de ciclos más cortos, tratando de evitar que, las primeras heladas que se esperan a finales de septiembre y/o principios de octubre, no afecten al cultivo. Este impacto diferenciado permitirá formular estrategias locales ante el cambio climático, con la finalidad de contribuir a la planificación de las actividades agrícolas.

6. Agradecimientos

Se agradece el apoyo al Colegio de Postgraduados, Campus Puebla y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de Doctorado.

6. Referencias citadas

- ACHLI, S.; EPULE, T. E.; DHIBA, D.; CHEHBOUNI, A. & S. ER-RAKI. 2022. "Vulnerability of Barley, Maize, and Wheat Yields to Variations in Growing Season Precipitation in Morocco". *Applied Sciences*, 12(7): 3407. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app12073407>.
- ARCE-ROMERO, A.; MONTERROSO-RIVAS, A. I.; GÓMEZ-DÍAZ, J. D.; PALACIOS-MENDOZA, M. A.; NAVARRO-SALAS, E. N.; LÓPEZ-BLANCO, J. & A. C. CONDE-ÁLVAREZ. 2020. "Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation", *Atmósfera*, 33(3): 215-231. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/ATM.52430>.
- BALLESTEROS-BARRERA, C.; JIMÉNEZ-GARCÍA, D. y J. HERNÁNDEZ-CÁRDENAS. 2011. "El impacto potencial del cambio climático sobre los agrosistemas. El caso del cultivo del maíz, proyecciones al futuro". En: G. A. ARAGÓN; G. JIMÉNEZ y L. HUERTA (Eds.), *Manejo Agroecológico de Sistemas* Vol. II, pp. 1-14. Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.
- BENDÁKOVÁ, V.; NAGY, H.; TURČEKOVÁ, N.; ADAMIČKOVÁ, I. & P. BIELIK. 2024. "Assessing the climate change impacts on maize production in the Slovak Republic and their relevance to sustainability: A case study". *Sustainability*, 16(13): 5.573. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su16135573>.

- CONDE, C.; FERRER R. M. y D. LIVERMAN. 2000. "Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES-MAIZE". En C. GAY (Ed). *México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, pp. 89-102. Instituto Nacional de Ecología y Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- CHRISTIANSEN, D. E.; MARKSTROM S. L. & L. E. HAY. 2011. "Impacts of climate change on the growing season in the United States". *Earth Interactions*, 15(33): 1-17.
- ESTRADA, F.; MENDOZA-PONCE, A.; CALDERÓN-BUSTAMANTE, O. & W. BOTZEN. 2022. "Impacts and economic costs of climate change on Mexican agricultura". *Regional Environmental Change*, 22: 126. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>.
- GRANADOS-RAMÍREZ, R.; AGUILAR-SÁNCHEZ, G.; DÍAZ-PADILLA, G. y M. de la P. MEDINA-BARRIOS. 2011. "Alteraciones de los indicadores agroclimáticos en años con presencia del fenómeno El Niño en la región centro-occidente de México". *Revista Geográfica de América Central*, 2: 1-16.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA y GEOGRAFÍA (INEGI). 2024. *AGEE Área Geoestadística Estatal*. Escala: 1:250.000. México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA y GEOGRAFÍA (INEGI). 2021. *Anuario Estadístico y Geográfico por entidad federativa 2021: versión actualizada/ Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. pp. 641. INEGI. México
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA y GEOGRAFÍA (INEGI). 2004. *Isolínea de Evapotranspiración de México*. Escala 1:1.000.000. CentroGEO. México.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2018. *Anexo I: Glosario* Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf. [Consulta: septiembre, 2024].
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. *Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_es-1.pdf. [Consulta: septiembre, 2024].
- JUÁREZ-SÁNCHEZ, J. P. y B. RAMÍREZ-VALVERDE. 2006. "El programa de subsidios directos a la agricultura (PROCAMPO) y el incremento de la producción de maíz en una región campesina de México". *Ra Ximhai*, 2(2): 373-391.
- LI, Y. & F. TIAN. 2024. "Impact of climate change on maize yield and response strategies: A review study". *Advances in Resources Research*, 4(3): 497-513. Disponible en: https://doi.org/10.50908/arr.4.3_497.

- MONTERROSO-RIVAS, A. I. y J. D. GÓMEZ-DÍAZ. 2021. "Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México". *Terra Latinoamericana*, 39: 1-19. Disponible en: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>.
- MONTERROSO-RIVAS, A. I.; GÓMEZ-DÍAZ, J. D.; SÁENZ-ROMERO, C.; LLUCH-COTA, S. E.; PÉREZ-ESPEJO, R.; SALVADEO, C. J.;... J. BACA DEL MORAL. 2015. "Sistemas de producción de alimentos y seguridad alimentaria". En: C. G y G. y J. RUEDA ABAD. (Eds.), *Reporte mexicano de cambio climático: Grupo II, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación. Programa de Investigación en Cambio Climático*, pp. 97-118. UNAM. México.
- MONTIEL-GONZÁLEZ, C.; GALLEGOS-TAVERA, Á.; ORTEGA-GÓMEZ, A. M.; BAUTISTA, F.; GOPAR-MERINO, F. & A. VELÁZQUEZ. 2019. "Agro climatic analysis for rainfed agricultura Ecosist". *Recur. Agropec.*, 6(17): 307-316.
- MONTILLA-PACHECO, A DE J.; PASTRÁN-CALLES, F. R. y H. A. DE LA TORRE-BURGOS. 2024. "Efectos del calentamiento global sobre el comportamiento del cultivo de maíz". *Revista de Ciencias Agropecuarias "ALLPA"*, 7(13): 48-58.
- MORADI, R.; KOOCHKEI, A. & M. NASSIRI MAHALLATI. 2014. "Adaptation of maize to climate change impacts in Iran". *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 19: 1.223-1.238. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9470-2>.
- MUELLER, B.; HAUSER, M.; ILES, C.; RIMI, R. H.; ZWIERS, F. W. & H. WAN. 2015. "Lengthening of the growing season in wheat and maize producing regions". *Weather and Climate Extremes*, 9: 47-56. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.04.001>.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN y LA AGRICULTURA (FAO). 2024. *Base de datos estadísticos de la FAO*. Disponible en: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. [Consulta: julio, 2024].
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN y LA AGRICULTURA (FAO). 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4737s.pdf>. [Consulta: enero, 2024].
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN y LA AGRICULTURA (FAO). 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Disponible en: <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>. [Consulta: enero, 2024].
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN y LA AGRICULTURA (FAO). 1997. No. 73. Roma, Italia.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). 2017. *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre normales climáticas (OMM-N° 1203)*. Edición de 2017. Ginebra, Suiza
- PÁJARO, H. D. y S. C. A. ORTIZ. 1992. "Estimación del periodo de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana". *Revista de Geografía Agrícola*, (17): 119-125.

- PENG, Q.; SHEN, R.; LIU, Y.; LI, X.; SUN, Q.; HUANG, J. & W. YUAN. 2024. "Spatial and temporal patterns of maize phenology in China from 2001 to 2020". *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129(10). Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2024JG008095>.
- QUANTUM GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (QGIS). 2023. *Una introducción fácil a los SIG*. Disponible en: <https://docs.qgis.org/3.28/es/docs/>. [Consulta: noviembre, 2023].
- RODRÍGUEZ DE LUQUE, J. J.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, C. E.; GOURDJI, S.; MASON-D'CROZ, D.; OBANDO-BONILLA, D.; MESA-DÍEZ, J. y S. D. PRAGER. 2016. "Impactos socioeconómicos del cambio climático de América Latina y el Caribe: 2020-2045". *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(78): 11-34.
- RUIZ-CORRAL, J. A.; MEDINA-GARCÍA, G.; FLORES-LÓPEZ, H. E.; RAMÍREZ-DÍAZ J. L.; DE LA CRUZ-LARIOS, L.; VILLALPANDO-IBARRA, J. F.; ... y O. RUIZ-ÁLVAREZ. 2016. "Impacto del cambio climático sobre la estación de crecimiento en el estado de Jalisco, México". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (Pub. Esp. 13): 2.627-2.638.
- RUIZ-CORRAL, J. A.; MEDINA-GARCÍA, G.; RAMÍREZ-DÍAZ, J. L.; FLORES-LÓPEZ H. E.; RAMÍREZ-OJEDA, G.; MANRÍQUEZ-OLMO, J. D.; ... y C. DE LA M. MORA. 2011. "Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (Pub. Esp. 2): 309-323.
- RUIZ-CORRAL, J. A.; RAMÍREZ-DÍAZ J. L.; FLORES-MENDOZA, F. J. y J de J. SÁNCHEZ-GONZÁLEZ. 2000. "Cambio climático y efectos sobre las áreas potenciales para maíz en Jalisco, México". *Revista de Fitotecnía Mexicana*, 23: 183-194.
- SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIO y PESQUERO (SIAP). 2024 *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. [Consulta: julio, 2024].
- SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIO y PESQUERO (SIAP). 2024a. *Panorama Agroalimentario 2023*. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2023/Panorama-Agroalimentario-2023. [Consulta: julio, 2024].
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN). 2024. *Información estadística climatológica*. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/>. [Consulta: junio, 2024].
- URETA, C.; GONZÁLEZ, E. J.; ESPINOSA, A.; TRUEBA, A.; PIÑEYRO-NELSON, A. & E. R. ÁLVAREZ-BUYLLA. 2020. "Maize yield in Mexico under climate change". *Agricultural Systems*, 177: 102697. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>.
- VELÁZQUEZ, J.; JUÁREZ, J. P.; RAMÍREZ-VALVERDE, B.; SÁNCHEZ, M. DEL V.; JIMÉNEZ, J. y O. R. TABOADA. 2019. "Regionalización de la producción de maíz de temporal en el Estado de Puebla, México". *Cuadernos Geográficos*, 58(2): 152-167.

- WANG, M.; LI, Y.; YE, W.; BORNMAN, J. F. & X. YAN. 2011. "Effects of climate change on maize production, and potential adaptation measures: a case study in Jilin Province, China". *Climate Research*. 46(3): 223-242. Disponible en: <https://doi.org/10.3354/cr00986>.
- WANG, Z. H.; CHEN, J.; LIB, Y.; LIC, C.; ZHANG, L. & F. CHEN. 2016. "Effects of climate change and cultivar on summer maize phenology". *International Journal of Plant Production*, 10(4): 509-526.
- ZARAZÚA-VILLASEÑOR, P.; RUIZ-CORRAL, J.; GONZÁLEZ-EGUIARTE, D.; FLORES-LÓPEZ, H. y J. RON-PARRA. 2011. "Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en Ciénega de Chapala, Jalisco". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2: 351-363.
- ŽYDELIS, R.; WEIHERMÜLLER, L. & M. HERBST. 2021. "Future climate change will accelerate maize phenological development and increase yield in the Nemoral climate". *Science of The Total Environment*, 784:147175. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147175>.

Lugar y fecha de finalización del artículo:

Puebla, México; enero, 2025

Revisión y corrección: abril, 2025