

Potencial productivo de maíz con escenarios de cambio climático en la subcuenca Lerma-Toluca

Corn production potential under climate change scenarios in the Lerma-Toluca sub-basin

Jocksan Edrey Reyes-Andrade¹ , Jesús Soria-Ruiz^{1*} , Héctor Daniel Inurreta-Aguirre² ,
Alejandro Cruz-González³ 

¹Sitio Experimental Metepec-INIFAP. Vial A. López Mateos Km 4.5, Carr. Toluca-Zitácuaro. Zinacantepec, Estado de México, México.

²Campo Experimental Cotaxtla-INIFAP. km 34 Carretera Federal Veracruz-Córdoba, Medellín de Bravo, Veracruz, México.

³Universidad Intercultural del Estado de México. Libramiento Francisco Villa s/n, C.P. 50640 San Felipe del Progreso, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: jsoriar@yahoo.com

Nota científica

Recibida: 20 de noviembre 2025

Aceptada: 13 de agosto 2026

RESUMEN. El maíz es el cultivo más importante de México y, en la subcuenca Lerma-Toluca, su producción enfrenta desafíos debido al cambio climático. El objetivo de este estudio fue estimar el potencial productivo del maíz de temporal en la subcuenca Lerma-Toluca bajo el escenario actual y futuro, considerando dos rutas de cambio climático. Se desarrolló una zonificación agroecológica empleando información climática observada del Servicio Meteorológico Nacional y proyecciones a partir de Modelos de Circulación General. Los resultados muestran que el potencial productivo medio es predominante en la región y tiende a disminuir de manera consistente entre 2050 y 2070 en ambos escenarios. No obstante, en el escenario más extremo para 2070 se proyecta un incremento de 96 812 ha con alto potencial productivo. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar estrategias de adaptación, como la adopción de variedades tolerantes a temperaturas elevadas y a la reducción de la disponibilidad hídrica.

Palabras clave: Modelos de circulación general, potencial productivo, rutas de concentración representativas.

ABSTRACT. Corn is Mexico's most important crop, and in the Lerma-Toluca sub-basin, its production faces challenges due to climate change. The objective of this study was to estimate the productive potential of rainfed corn in the Lerma-Toluca sub-basin under current and future scenarios, considering two climate change pathways. Agroecological zoning was developed using observed climate data from the National Meteorological Service and projections from General Circulation Models. The results show that average productive potential is predominant in the region and tends to decrease consistently between 2050 and 2070 in both scenarios. However, in the most extreme scenario for 2070, an increase of 96 812 ha with high productive potential is projected. These findings underscore the need to implement adaptation strategies, such as the adoption of varieties tolerant to high temperatures and reduced water availability.

Keywords: General circulation models, productive potential, representative concentration pathways.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático (CC) y la variabilidad climática (CV) son una amenaza crítica que afecta a los sistemas agrícolas (Cruz-González *et al.* 2023). Estos fenómenos son causados por el aumento de los gases de efecto invernadero y alteran los patrones de temperatura y precipitación (IPCC 2014, Guerrero-Carrera y Hernández-Flores 2024). Aunado a esto, la naturaleza dinámica de estos procesos genera incertidumbre en la magnitud, así como la distribución espacial y temporal de sus impactos futuros (Právělie *et al.* 2020, Getnet *et al.* 2023). Estos cambios se han evidenciado en la distribución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura (IPCC 2023, Guerrero-Carrera y Hernández-Flores 2024), lo que conlleva consecuencias adversas en términos de ingresos y seguridad alimentaria para las comunidades del sector agrícola (Orozco-Bolaños *et al.* 2019). Estas alteraciones se han documentado en varias regiones, lo que enfatiza la necesidad de identificar las áreas donde los cultivos puedan expresar su máximo potencial productivo en el futuro (Soria-Ruiz y Medina-García 2022a). Para abordar este desafío, la comunidad científica ha desarrollado diversas herramientas. Por un lado, los modelos climáticos permiten proyectar los cambios presentes y futuros. El aumento de temperatura puede predecirse con mayor precisión, mientras que los cambios en los patrones de precipitación son más inciertos (Gowtham *et al.* 2020). También se ha utilizado la zonificación agroecológica, que se ha consolidado como una herramienta esencial para la adaptación agrícola, ya que permite identificar las zonas aptas para el cultivo en condiciones climáticas específicas (Manorama *et al.* 2014).

En México, el maíz es el cultivo más importante desde el punto de vista alimentario, económico y social (SADER 2023). No obstante, a pesar de la amplia superficie destinada a su siembra, una parte importante de la demanda nacional continúa cubriéndose con importaciones, principalmente procedentes de Estados Unidos, lo que evidencia una dependencia estructural del mercado externo (Rasooli *et al.* 2025). En este contexto, si bien la modernización agrícola puede contribuir a mejorar la productividad, la preservación de los maíces nativos de México es crucial, ya que estos presentan una mayor resiliencia a las condiciones climáticas y edáficas locales, lo que contribuye a la estabilidad productiva, especialmente en zonas de cultivo de temporal, donde las variedades nativas han demostrado ser más resistentes a los estrés abióticos y bióticos en comparación con las variedades comerciales (Santillán-Fernández *et al.* 2021).

El cultivo de maíz en México se extiende en los 32 estados de la república, entre ellos, el Estado de México ocupa el cuarto lugar nacional. Además, el cultivo de maíz en esta región se caracteriza por el predominio de la agricultura de temporal, de lo cual el 26%, corresponde a temporal favorable y el 54% a temporal limitado, el resto corresponde a agricultura de riego (SIAP 2023, Ocampo De Jesús *et al.* 2025). En especial, la subcuenca Lerma-Toluca ubicada en la zona centro y noroeste del Valle de Toluca-Atlacomulco en el Estado de México concentra nueve de los diez municipios con mayor producción de maíz, con un 42% del volumen estatal (INEGI 2019, SECAMPO 2023). En este contexto, se desconoce el impacto que pueda tener el CC y la CV en la producción de maíz de temporal en la subcuenca Lerma-Toluca. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue determinar el potencial productivo de maíz (*Zea mays* L.) de temporal en el área agrícola de la subcuenca Lerma-Toluca bajo el escenario actual y futuro (2050 y 2070) de cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en la Subcuenca Río Lerma-Toluca (Figura 1), ubicada en las coordenadas geográficas extremas 19° 05' y 20° 05' de latitud norte y los 99° 25' y 100° 15' de longitud oeste, con una extensión de 5 354 km², que incluye de manera parcial o total a 30 municipios del Estado de México (INEGI 2019).

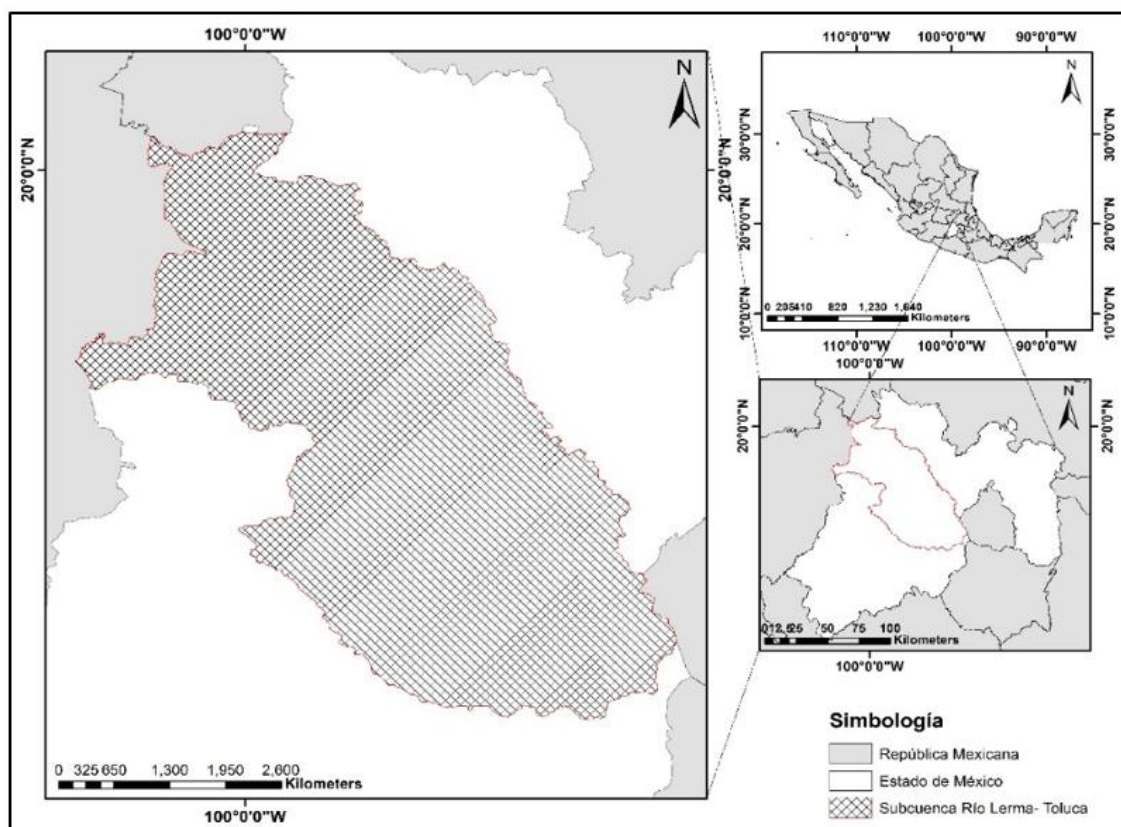


Figura 1. Ubicación de la Subcuenca Río Lerma-Toluca como área de estudio.

Frontera agrícola

Para esta investigación se utilizó la capa de información de la superficie agrícola generada y actualizada por Soria-Ruíz y Medina-García (2022a), y que fue generada de la siguiente manera: a) La identificación de las áreas agrícolas se realizó mediante una clasificación supervisada de imágenes satelitales Sentinel-2 (14 QLH, 14 QMH, 14 QNH, 14 QLG, 14 QMG, 14 QNG, 14 QLF y 14 QMF), que cubren todo el Estado de México. Las imágenes fueron obtenidas de la plataforma Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), con una resolución espacial de 10 m. Para la digitalización, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), específicamente ArcGIS versión 10.5 (Esri 2017). y b) para validar las áreas agrícolas que presentaban confusión, es decir, zonas en las que no fue posible determinar claramente si pertenecen a la categoría agrícola o no, debido a la presencia de características mixtas o transicionales entre usos de suelo; para ello, se realizaron recorridos de campo, con el fin de validar las clasificaciones en función de criterios de

uso del suelo, como cultivos y vegetación predominante. La frontera agrícola, actualizada al 2022, indica que la Subcuenca Río Lerma-Toluca abarca una superficie total de 531 842.8 hectáreas, representando el 70% del área de estudio (Figura 2).

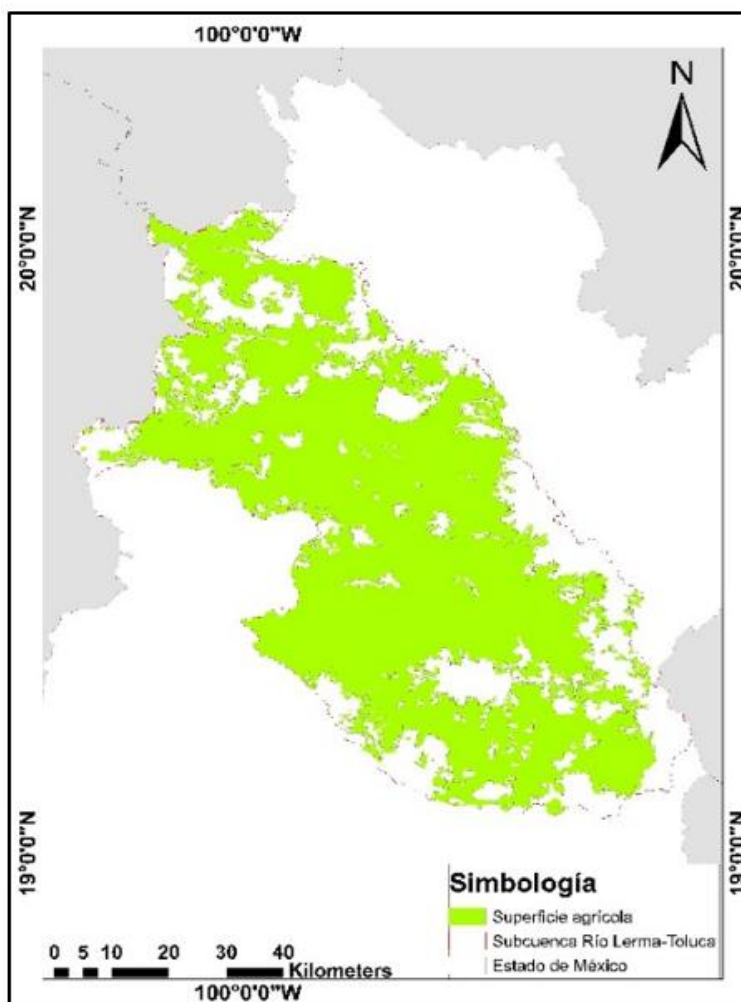


Figura 2. Distribución de la superficie agrícola del área de estudio.

Base de datos climatológicos

La base de datos de temperatura y precipitación se generó con la información climatológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2023), correspondiente a las normales climatológicas del periodo 1991-2020. A partir de esta fuente se obtuvo información de 121 estaciones climatológicas ubicadas en el Estado de México y sus alrededores. Debido a que se trabajó con normales climatológicas oficiales, en esta investigación no se efectuó una reconstrucción independiente de registros ausentes; se utilizaron únicamente estaciones con información disponible y consistente para las variables analizadas. Para el presente estudio se consideró el periodo mayo-octubre, correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano del cultivo de maíz. Con esta base de datos, se generaron las superficies climáticas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación del periodo 1991-2020. Estos modelos se obtuvieron mediante el método de interpolación spline

del paquete ANUSPLIN (Hutchinson y Xu 2013, Zhang y Zhou 2021), utilizando la latitud, longitud (Guo *et al.* 2020) y la elevación como covariable (Yener 2023).

Obtención de datos climáticos futuros

Para la estimación de escenarios climáticos futuros, se utilizó una base de datos de anomalías mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación medias mensuales obtenidas del modelo ensamble integrado por 11 Modelos de Circulación General (MCG), reducidos en escala y calibrados, considerados y validados para México y reportados en el Quinto Reporte del IPCC (IPCC 2014, Salinas *et al.* 2014). Los modelos utilizados fueron: BCC- CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3 y NorESM1-M (Díaz-Padilla *et al.* 2012, Hernández-Ochoa *et al.* 2018, Medina-García *et al.* 2020, Soria-Ruiz y Medina-García 2022a). La información se obtuvo del portal de datos de cambio global de WorldClim con una resolución de 30" de arco, utilizando como climatología de referencia las normales climatológicas 1991-2020 (SMN 2023). Cabe mencionar que no se emplearon las variables bioclimáticas de WorldClim, ya que el análisis se centró en variables climáticas directas y mensuales con significado agronómico para el cultivo de maíz, durante el ciclo primavera-verano. Estas variables permiten representar de forma más precisa las condiciones térmicas e hídricas que inciden en el desarrollo del cultivo. En cambio, las variables bioclimáticas corresponden a índices derivados, más utilizados en análisis de distribución potencial de especies que en evaluaciones agroclimáticas orientadas a requerimientos específicos del cultivo.

Se utilizaron dos rutas de concentración representativas (RCP) de gases de efecto invernadero (GEI): RCP 4.5, que representa un escenario de emisiones intermedias con moderadas reducciones, y RCP 8.5, que describe un escenario de altas emisiones sin cambios en las políticas actuales para su reducción (INECC 2022). Posteriormente, se tomó la climatología de referencia y se trabajó en formato ráster, sumando algebraicamente las anomalías futuras derivadas del modelo de ensamble. Con estos datos mensuales se calcularon las temperaturas medias y la precipitación acumulada correspondientes al ciclo primavera-verano (P-V) (mayo-octubre) para los escenarios climáticos 2041-2060 y 2061-2080, referidos como climatologías de los años 2050 y 2070 respectivamente.

Estimación del potencial productivo de maíz

La estimación del potencial productivo del cultivo se basó en la metodología propuesta por Medina-García *et al.* (2020) y Soria-Ruiz y Medina-García (2022a), que considera los requerimientos agroecológicos del maíz (Tabla 1). Se determinaron las áreas potenciales con tres niveles de potencial productivo (alto, medio y bajo) para el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal del ciclo primavera-verano, considerando tanto la climatología base como los escenarios climáticos futuros. Para la obtención de las superficies potenciales, se utilizó la información de temperatura y precipitación, datos edafológicos de la serie III con escala 1:250 000 (INEGI 2014). El análisis geoespacial se llevó a cabo utilizando el sistema de información geográfica ArcGIS versión 10.5. Como resultado de este proceso, se determinó el potencial productivo del maíz bajo el escenario de cambio climático actual (2020) y dos escenarios climáticos futuros (2050 y 2070) con RCP 4.5 y RCP

8.5. Con los resultados obtenidos, se proponen algunas medidas de adaptación para los escenarios climáticos estudiados.

Tabla 1. Requerimientos agroecológicos utilizados para determinar el potencial productivo de maíz de temporal del ciclo agrícola P-V en el área de estudio.

Variable	Clasificación		
	Alto	Medio	Bajo
Rango de temperatura (°C)	18 – 24	12 – 18 o 24 – 30	< 12 o > 30
Rango de precipitación (mm)	630 – 1 500	420 – 630 o 1 500 – 1 900	< 420 o > 1 900
Suelo	Profundos sin sales	Delgados y salinos	Fuertemente salinos
Uso de suelo	Se consideraron sólo las zonas agrícolas		
Suelo	Se excluyeron litosoles, rankers, solanchaks y solonets		

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelación climática

Los resultados del análisis climático muestran que, en el escenario actual, la temperatura en el área de estudio ha fluctuado entre 5.2 °C y 16.5 °C. De acuerdo con los requerimientos agroecológicos del cultivo, esta variación permite que la mayor parte del área de estudio reporte un potencial productivo medio para el maíz. Los escenarios futuros proyectan temperaturas más favorables debido al aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), lo que genera un incremento en la temperatura y favorece las condiciones para que el maíz alcance un potencial productivo alto en varias zonas del área de estudio. Se observa que con el RCP 4.5, la temperatura alcanzará 18.5 °C y 18.9 °C en los escenarios 2050 y 2070, respectivamente. Con el RCP 8.5, la temperatura alcanzará 19.3 °C y 20.5 °C en los escenarios 2050 y 2070, respectivamente (Figura 3).

Los aumentos de temperatura proyectados para los escenarios futuros en la subcuenca del Río Lerma-Toluca son consistentes con las tendencias históricas reportadas por Cruz-González *et al.* (2023) en la región de Atlacomulco, que forma parte de la misma cuenca. Sin embargo, es importante señalar que el estudio antes mencionado incluyó modelos de circulación general (MCG) diferentes, lo que podría explicar posibles variaciones en los resultados climáticos proyectados. A pesar de esta diferencia en los enfoques, las tendencias en temperatura son similares, lo que refuerza la idea de que, aunque las subcuencas pueden tener variaciones locales, los patrones climáticos a gran escala son consistentes. Estos cambios son atribuibles al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (INECC 2022), pues las variables climáticas muestran cambios, ya que el uso de suelo del área de estudio se mantiene para el uso agrícola, y no se observan cambios significativos en el clima. Aunque este incremento favorece el buen desarrollo del cultivo, es importante considerar los eventos climáticos extremos (ondas de calor y sequías prolongadas), que podrían generar estrés térmico en el cultivo y mayor evapotranspiración y requerimiento de agua, afectando la productividad (Altieri *et al.* 2015). Por otra parte, las heladas son un factor limitante durante la etapa de floración del maíz, que reduce el rendimiento y la calidad del grano (Jasso-Miranda *et al.* 2022).

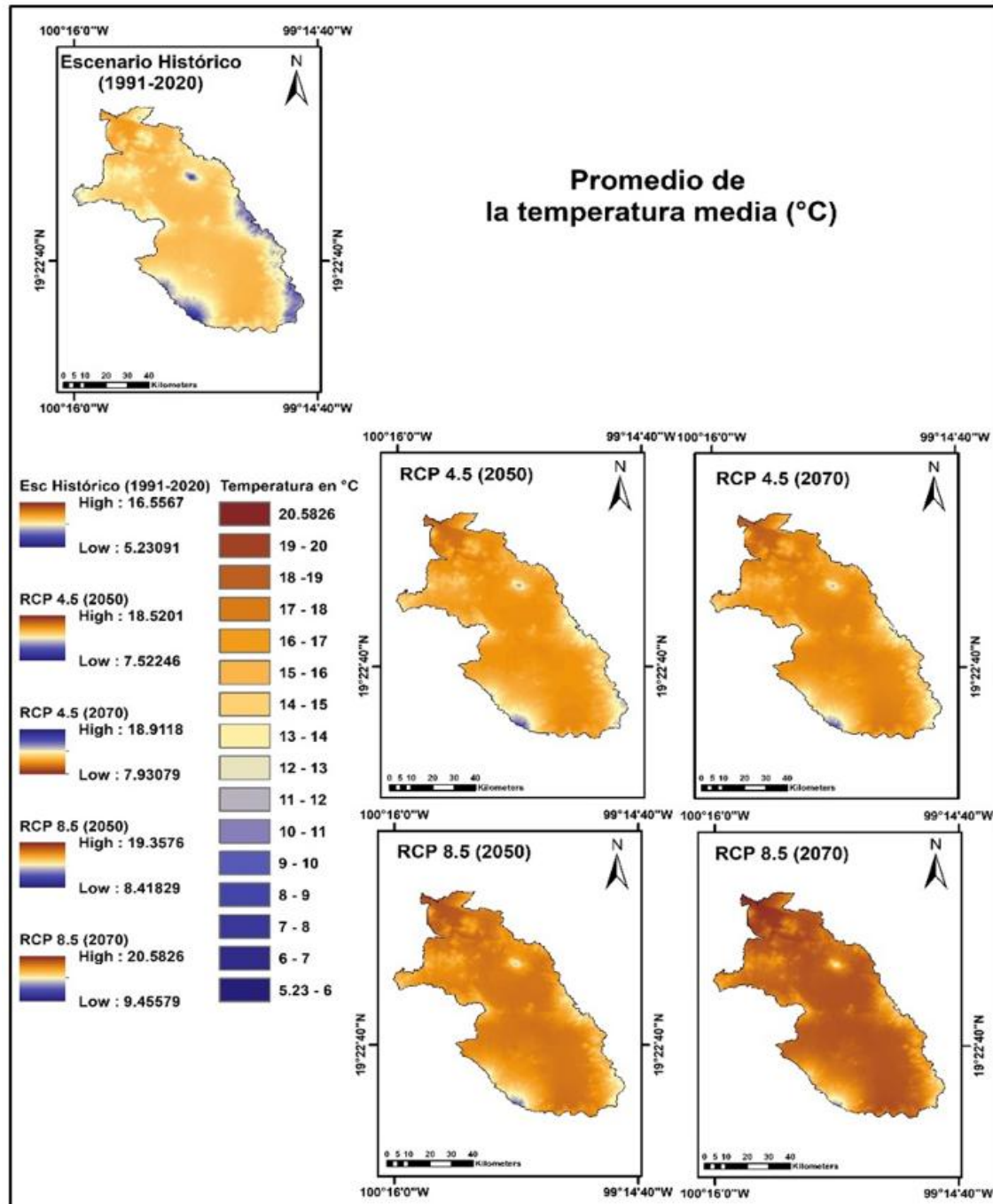


Figura 3. Comportamiento de la temperatura media (mayo-octubre) bajo los escenarios actual y futuros de CC.

Respecto de la precipitación, con el escenario actual ha variado entre 592 y 1 330 mm acumulados en el periodo mayo-octubre; la cual es favorable en la mayor parte del área de estudio, ya que la disponibilidad de agua permite un mejor desarrollo del cultivo y puede favorecer un incremento de la superficie en áreas con potencial medio a alto. Los valores más elevados de precipitación pluvial se localizan en zonas altas debido a factores orográficos, ya que el ascenso del aire húmedo sobre las montañas provoca enfriamiento y condensación, lo que favorece la formación de nubes

y, posteriormente, precipitaciones. Aunque los escenarios futuros indican una reducción en la precipitación, este estudio prevé que la cantidad de lluvia acumulada aún estará dentro de los rangos para abastecer los requerimientos hídricos del cultivo del maíz, lo que permitirá conservar la superficie cultivada con mediano potencial productivo (Tabla 1). Además, se observa que en los escenarios futuros con RCP 4.5, la precipitación muestra un rango de 585 mm a 1 219 mm en el escenario 2050; y de 582 mm a 1 217 mm en el escenario 2070; por su parte con RCP 8.5; esta muestra una mayor disminución de 533 mm a 1 169 mm en el escenario 2050; y de 486 mm a 1 106 mm en el escenario 2070 (Figura 4).

La cantidad de lluvia podría solventar los requerimientos del cultivo, no obstante, la distribución acumulada durante el año es incierta. Periodos prolongados de sequías y lluvias torrenciales podrían tener efectos negativos en la superficie cultivada y el rendimiento del cultivo en algunas regiones del área de estudio. En el escenario actual, los valores más altos de precipitación se observan en la región sur del área de estudio, que corresponde a zonas de mayor altitud. En los escenarios futuros, se observa una disminución generalizada de la precipitación en toda el área del estudio respecto del escenario actual, incluida la zona sur de mayor altitud. La reducción de precipitaciones es más pronunciada en las zonas altas, debido al efecto orográfico. En las zonas de menor elevación también se observa una reducción. La mayor afectación se reporta en el escenario 2070 con RCP 8.5, ya que se observa una reducción dramática de la lluvia en toda el área de estudio, de forma más marcada en las zonas de elevación media a baja.

Aunque la precipitación total prevista se mantendrá dentro de los rangos adecuados según los requerimientos agroecológicos del cultivo del maíz, su distribución durante las etapas fenológicas puede afectar significativamente el rendimiento del maíz. Las reducciones moderadas de las lluvias (10-20%) podrían ser beneficiosas en zonas con exceso de humedad (Patidar *et al.* 2020), particularmente en regiones bajas de la subcuenca Lerma-Toluca, caracterizada por una alta variabilidad interanual y estacional (Cruz-González *et al.* 2023); ya que cualquier disminución o irregularidad en la distribución de las precipitaciones podría propiciar estrés hídrico, limitando el rendimiento y la producción del maíz en esta región.

El aumento de la temperatura de hasta 2 °C y la disminución de más de 200 mm en las precipitaciones durante el ciclo del cultivo con el escenario 2070 y RCP 8.5, coincide con los resultados reportados por Cavazos *et al.* (2013). Estos cambios podrían aumentar los niveles de evapotranspiración y generar estrés hídrico en los cultivos, tal y como advierten Medina-García *et al.* (2017); lo que reduciría la disponibilidad de humedad del suelo para las plantas. En este sentido, Wang *et al.* (2022) señalan que el cambio climático aumentará el riesgo de sequía agrícola y comprometerá la seguridad alimentaria, especialmente en los sistemas de producción de secano.

Potencial productivo de maíz actual y futuro

En el escenario actual, la zona agrícola presenta un potencial productivo medio en el ciclo agrícola primavera-verano; esto debido a las condiciones favorables del suelo y el clima; no obstante, las bajas temperaturas limitan el desarrollo del maíz en las primeras etapas fenológicas del cultivo, ya que inhiben su desarrollo (Figura 5). Estos resultados coinciden con estudios de Díaz-Padilla *et al.* (2012); a pesar del aumento de la temperatura en las décadas recientes (Soria-Ruiz y Medina-García 2022a, 2022b). Sin embargo, las heladas tempranas (Cruz-González *et al.* 2024; Jasso-Miranda *et al.*

2022) siguen siendo un factor limitante que inhibe el crecimiento y el desarrollo del maíz, particularmente en las etapas fenológicas de crecimiento y llenado de grano.

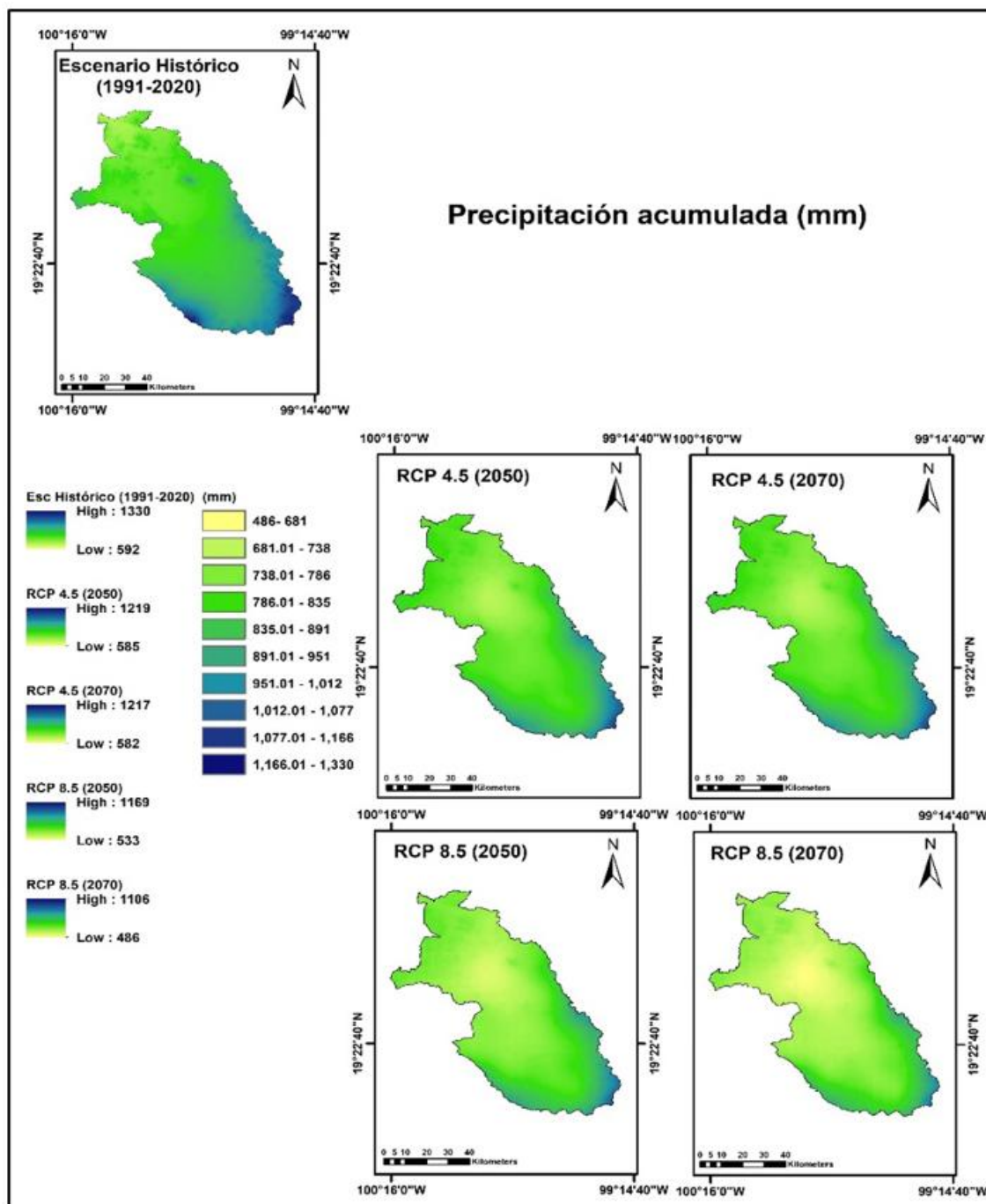


Figura 4. Comportamiento de la precipitación acumulada (mayo-octubre) bajo los escenarios actual y futuros de CC.

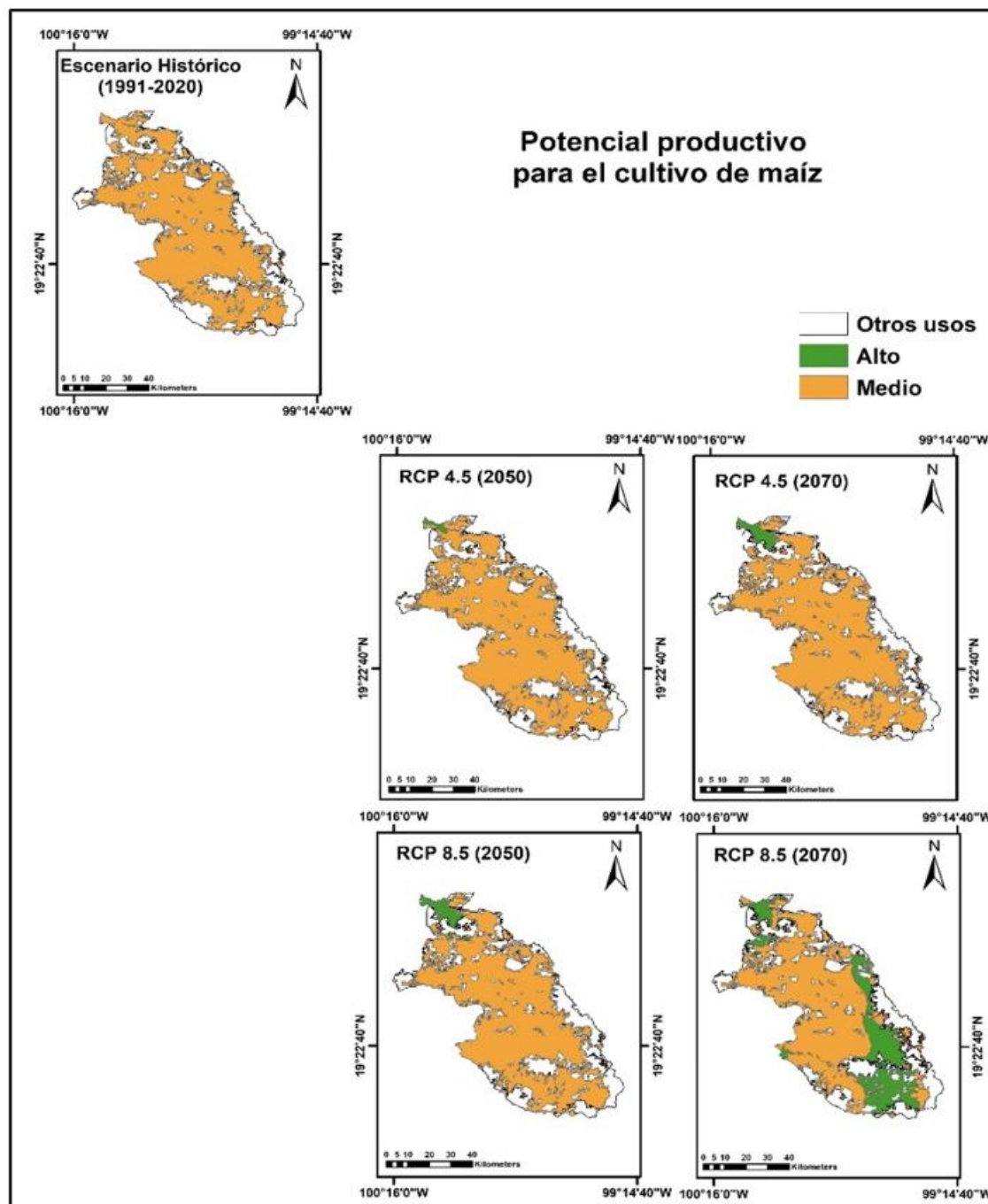


Figura 5. Superficies potenciales de maíz de temporal en el área de estudio bajo los escenarios actual y futuros de CC.

Con base en los datos obtenidos del potencial productivo actual, la superficie con potencial productivo medio es de 373 881.33 ha. Con el escenario 2050 y RCP 4.5 se obtuvieron regiones con potencial productivo alto en la zona norte de la cuenca con una superficie de 2 404.83 ha (aumento del 0.64% con respecto del total actual); y con el escenario 2070, aumenta la superficie de potencial productivo alto con 9 960.46 ha (incremento del 2.66% respecto del total actual); mientras que la superficie con potencial productivo medio disminuyó en 0.94%. Con el escenario 2050 y RCP 8.5,

la superficie con potencial productivo alto se incrementó a 13 884.97 ha (3.71% con respecto del total actual); por su parte con el escenario 2070 y RCP 8.5, se registra un incremento en la superficie con potencial productivo alto de 96 811.87 ha (incremento del 25.89% con respecto del total actual), lo que redujo en consecuencia la superficie con potencial productivo medio en un 24.30% respecto del actual.

Con base en los resultados obtenidos en el escenario 2070 y RCP 8.5, se prevé una expansión significativa de la superficie con alto potencial productivo, particularmente en los valles altos debido al incremento de la temperatura, que favorecerá el desarrollo del cultivo del maíz (Hatfield *et al.* 2011), lo que coincide con lo reportado por Ruiz-Corral *et al.* (2011) y Cruz-González *et al.* (2025) para las regiones templadas de México. Por su parte, Patidar *et al.* (2020) y Gowtham *et al.* (2020) mencionan que los aumentos de temperatura superiores a 1 °C pueden reducir el rendimiento del maíz hasta en un 10%, al acortar drásticamente el ciclo fenológico del maíz y afectar negativamente la etapa de llenado del grano.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación sugieren implementar estrategias de manejo del cultivo para mitigar los efectos del estrés térmico, mediante el uso de variedades tolerantes a las altas temperaturas y ajustes en las fechas de siembra (Gowtham *et al.* 2020). La marcada reducción del potencial medio (-24.30%) con el escenario RCP 8.5 para 2070 puede deberse a que algunas zonas serán afectadas por la variabilidad climática, principalmente por el incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación. Al respecto, Hernández-Vázquez *et al.* (2018) destacan que los efectos del cambio climático no son homogéneos y que la adaptación debe diferenciarse en el contexto local.

Actualmente, la subcuenca Lerma-Toluca tiene un potencial productivo medio para el cultivo de maíz de temporal. Bajo el escenario RCP 4.5, tiene un aumento moderado dentro del área con potencial productivo alto para los años 2050 y 2070 (Tabla 2). Pero en el escenario RCP 8.5 tiene un aumento significativo en la superficie con 96 811.87 ha (25.89%) con potencial alto sobre todo en el escenario 2070, con una disminución del 24.30% para las áreas de potencial medio. Estos resultados indican que el cambio climático podría favorecer el potencial de producción de maíz en la subcuenca Lerma-Toluca, con el aumento de temperatura, particularmente en las zonas de valles altos. Aunque la magnitud de este beneficio dependerá del escenario de emisiones, la disponibilidad de agua y el manejo del cultivo durante el ciclo primavera-verano. Por ello, se recomienda incorporar estrategias de adaptación, como el uso de variedades tolerantes a mayores temperaturas y a la reducción de disponibilidad hídrica en la planificación agrícola de la subcuenca.

Tabla 2. Superficies potenciales de maíz en el área de estudio bajo los escenarios actual y futuros de CC.

Escenarios		Superficies potenciales (ha)		
		Alto	Medio	Bajo
Actual 1991-2020	2020	0	373 881.33	0
	2050	2 404.83	377 491.55	0
Futuros con RCP 4.5	2070	9 960.46	369 977.95	0
	2050	13 884.97	366 052.74	0
Futuros con RCP 8.5	2070	96 811.87	283 090.52	0

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo proporcionado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), cuyo respaldo fue fundamental para llevar a cabo este trabajo de investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

LITERATURA CITADA

- Altieri MA, Nicholls CI, Henao A, Lana MA (2015) Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35(3): 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Cavazos T, Salinas JA, Martínez B, Colorado G, de Grau P, Prieto-González R, Conde-Álvarez AC, Quintanar-Isaías A, Santana-Sepúlveda JS, Romero-Centeno R, Maya-Magaña ME, Rosario-de-la-Cruz JG, Ayala-Enríquez MR, Carrillo-Tlazazanatza H, Santiesteban O, Bravo ME (2013) Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final. Centro de Ciencias de La Atmósfera, UNAM, México. 150p.
- Cruz-González A, Arteaga-Ramírez R, Monterroso-Rivas AI, Sánchez-Cohen I, Soria-Ruiz J, Quevedo-Nolasco A (2025) Climate change impacts on the accumulation of growing degree days for corn in central Mexico. *Journal of Agrometeorology* 27(1): 38-42. <https://doi.org/10.54386/jam.v27i1.2783>
- Cruz-González A, Arteaga-Ramírez R, Sánchez-Cohen I, Soria-Ruiz J, Monterroso-Rivas AI (2024) Impactos del cambio climático en la producción de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 15(1). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3327>
- Cruz-González A, Arteaga-Ramírez R, Sánchez-Cohen I, Soria-Ruiz J, Monterroso-Rivas IA, 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: 3868. <https://doi.org/10.19136/era.a10nIII.3868>
- Díaz-Padilla G, Guajardo-Panes RA, Medina-García G, Sánchez-Cohen I, Soria-Ruiz J, Vázquez-Alvarado JMP, Quijano-Carranza JÁ, Legorreta-Padilla F, Ruiz-Corral JA (2012) Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Xalapa, Veracruz, México. 140p.
- Esri (2017) ArcGIS version 10.5 [Software]. <https://www.esri.com>. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2024.
- Getnet GT, Bantider DA, Ayal DY (2023) Spatiotemporal variability and trends of rainfall and temperature in the tropical moist montane ecosystem: Implications to climate-smart agriculture in Geshy watershed, Southwest Ethiopia. *Climate Services* 30: 9. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100384>
- Gowtham R, Bhuvaneshwari K, Senthil A, Dhasarathan M, Revi A, Bazaz A (2020) Impact of global warming (1.5°C) on the productivity of selected C3 and C4 crops across Tamil Nadu. *Journal of Agrometeorology* 22(1): 7-17. <https://doi.org/10.54386/jam.v22i1.115>

- Guerrero-Carrera J, Hernández-Flores JA (2024) Impacto del cambio climático en la producción de café en Veracruz bajo un enfoque Ricardiano. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3896>
- Guo B, Zhang J, Meng X, Xu T, Song Y (2020) Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN. *Scientific Reports* 10(1): 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57078-3>
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurral RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D (2011) Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal* 103: 351-370.
- Hernandez-Ochoa IM, Asseng S, Kassie BT, Xiong W, Robertson R, Luz Pequeno DN, Sonder K, Reynolds M, Babar MA, Molero MA, Hoogenboom G (2018) Climate change impact on Mexico wheat production. *Agricultural and Forest Meteorology* 263: 373-387. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008>
- Hernández-Vázquez M, García-Juárez G, Orozco-Bolaños H, Juárez-Ortiz MG (2018) Vulnerabilidad socioambiental del maíz nativo frente al cambio climático en el estado de Tlaxcala, México. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias* 7(14): 53-76. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i14.80>
- Hutchinson MF, Xu T (2013) ANUSPLIN Version 4.4. Centre for Resource and Environmental Studies. Australian National University. Australia. 52p.
- INECC (2022) Guía sobre escenarios de cambio climático para tomadores de decisiones. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/conten_intro/Guia_de_Escenarios_CC_mar2022.pdf. Fecha de consulta: 07 de marzo de 2024.
- INEGI (2014) Conjunto Nacional de Información Edafológica. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#> Fecha de consulta: 19 de enero de 2024.
- INEGI (2019) Cuenca hidrológica Río Lerma 1. Humedales. Informe Técnico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#>. Fecha de consulta: 06 de noviembre de 2023.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Pachauri, RK, Meyer AM (eds) Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. 151p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Fecha de consulta: 3 de junio de 2024.
- IPCC (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change In: Lee H, Romero J (eds) IPCC, Geneva, Switzerland. pp. 1-34. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Jasso-Miranda M, Soria-Ruiz J, Antonio-Némiga X (2022) Pérdida de superficies cultivadas de maíz de temporal por efecto de heladas en el valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(2): 207-222. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2587>
- Manorama K, Govindakrishnan PM, Rawat S, Ravichandran G, Lal SS (2014) Agro ecological zoning and estimation of potential yield of potato in plateau regions of India. *Journal of Agrometeorology* 16(2): 192-194. <https://doi.org/10.54386/jam.v16i2.1519>
- Medina-García G, Echavarría-Cháirez FG, Ruiz-Corral JA, Rodríguez-Moreno VM, Soria-Ruiz J, De la Mora-Orozco C (2020) Efecto del calentamiento global sobre la producción de alfalfa en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* (11): 34-48. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4686>
- Medina-García G, Ruiz-Corral JA, Rodríguez-Moreno VM, Soria-Ruiz J, Díaz- Padilla G, Zarazúa-Villaseñor P (2017) Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (13): 2465-2474. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.461>

- Ocampo De Jesús R, Sotelo-Ruiz E D, Salgado-Benítez G, Flores-López R, Martínez-Mendoza A A, Gil-Gil H (2025) Evaluación de rendimiento de maíz para Valles Altos del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 16(1): e3368. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i1.3368>
- Orozco-Bolaños H, Hernández-Vázquez M, García-Juárez G, Suárez-González G (2019) Cambio climático: Una percepción de los productores de maíz de temporal en el estado de Tlaxcala, México. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias* 8(16): 1-26. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i16.89>
- Patidar R, Mohanty M, Sinha NK, Gupta SC, Somasundaram J, Chaudhary RS, Soliya R, Hati KM, Prabhakar M, Sammi RK, Patra AK, Rao ChS (2020) Potential impact of future climate change on maize (*Zea mays* L.) under rainfed condition in central India. *Journal of Agrometeorology* 22(1): 18-23. <https://doi.org/10.54386/jam.v22i1.117>
- Prăvălie R, Sîrodoev I, Patriche C, Roşca B, Piticar A, Bandoc G, Sfîcă L, Tişcovschi A, Dumitraşcu M, Chifiriuc C, Mănoiu V, Iordache Ş (2020) The impact of climate change on agricultural productivity in Romania. A country-scale assessment based on the relationship between climatic water balance and maize yields in recent decades. *Agricultural Systems* 179: 102767. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102767>
- Rasooli S, Cervantes-Avilés PA, Sandoval-Reyes M, Huerta-Aguilar CA (2025) The Mexican maize panorama: Socio-economic study of agricultural productivity and import dependency. *Outlook on Agriculture* 54(3): 272–284. <https://doi.org/10.1177/00307270251343098>
- Ruiz-Corral JA, Medina-García G, Ramírez-Díaz JL, Flores-López HE, Ramírez-Ojeda G, Manríquez-Olmos JD, Zarazúa-Villaseñor P, González-Eguiarte DR, Díaz-Padilla G, de la Mora-Orozco C (2011) Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(spe2): 309-323.
- SADER (2023) Maíz, cultivo de México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural <http://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-cultivo-de-mexico>. Fecha de consulta: 16 de agosto de 2023.
- Salinas JA, Colorado G, Montero-Martínez MJ, Maya-Magaña ME, Gonzáles-Robles M (2014) Actualización y divulgación de los nuevos escenarios de Cambio Climático aplicados a México para fortalecer las capacidades nacionales. Informe Final. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. 169p.
- Santillán-Fernández A, Salinas-Moreno Y, Valdez-Lazalde JR, Carmona-Arellano MA, Vera-López JE, Pereira-Lorenzo S (2021) Relationship between maize seed productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the adoption of genetically modified maize and the resilience of local races. *Agriculture* 11(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture11080737>
- SECAMPO (2023) Análisis de Tendencia de la Producción, de los Principales Productos Agrícolas, Florícolas y Pecuarios en el Estado de México. Secretaría del Campo del Estado de México. https://secampo.edomex.gob.mx/subsector_agricola. Fecha de consulta: 07 de agosto de 2023.
- SIAP (2023) Cierre de la producción agrícola por municipio. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ Fecha de consulta: 20 de marzo de 2024.
- SMN (2023) Normales climatológicas por Estado. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/>. Fecha de consulta: 5 de octubre de 2023.
- Soria-Ruíz J, Medina-García G (2022a) Escenarios futuros de cambio climático para maíz de temporal en el Estado de México. *Revista Tecnológica CEA* 18. www.revistatecnologicaceamx.mx. Fecha de consulta: 23 de enero de 2024.
- Soria-Ruíz J, Medina-García G (2022b) Potencial productivo del maíz de temporal con escenario actual de cambio climático para el Estado de México. *Revista Tecnológica CEA* 18. www.revistatecnologicaceamx.mx. Fecha de consulta: 23 de enero de 2024.

- Wang Z, Ye L, Jiang J, Fan Y, Zhang X (2022) Review of application of EPIC crop growth model. *Ecological Modelling*, 467: 109952. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109952>
- Yener İ (2023) Development of high-resolution annual climate surfaces for Turkey using ANUSPLIN and comparison with other methods. *Atmosfera* 37: 425-444. <https://doi.org/10.20937/ATM.53189>
- Zhang B, Zhou W (2021) Spatial-temporal characteristics of precipitation and its relationship with land use/cover change on the qinghai-tibet plateau, China. *Land* 10(3). <https://doi.org/10.3390/land10030269>