



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente
en Zonas Áridas**

**SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL
CULTIVO DE MAÍZ BAJO CONDICIONES LIMITADAS DE
DISPONIBILIDAD DE AGUA CON EL MODELO ALMANACMEX**

T E S I S

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

Presenta:

ANA CECILIA PORTILLO BAEZ

Bajo la supervisión del Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Bermejillo, Durango, México. Junio 2025



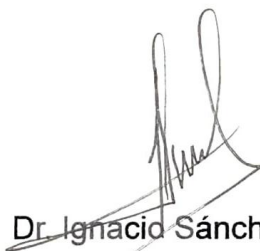
iniap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

**SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ
BAJO CONDICIONES LIMITADAS DE DISPONIBILIDAD DE AGUA CON EL
MODELO ALMANACMEX**

Tesis realizada por **ANA CECILIA PORTILLO BAEZ** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
DE ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR



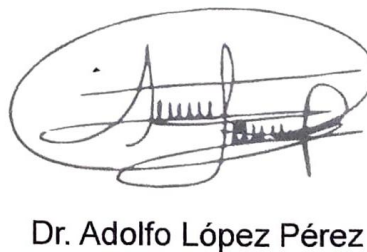
Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CODIRECTOR



Dr. Ricardo Trejo Calzada

ASESOR



Dr. Adolfo López Pérez

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	vi
CAPITULO 1. Introduccion general.....	1
CAPITULO 2. Revision de literatura	4
2.1 Las zonas áridas	4
2.2 Agricultura de secano	5
2.3 Efecto de la labranza en el suelo	5
2.4 Modelo.....	7
2.5 Modelo de Simulación	7
2.6 Importancia de los modelos de simulación para la agricultura	7
2.7 Calibración	8
2.8 Validación	8
2.9 Literatura citada.....	8
CAPITULO 3. Simulación del crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz en zonas áridas con diferentes métodos de labranza mediante el uso del modelo ALMANACMEX.....	14
Resumen	15
Abstract	15
3.1. Introducción.....	16
3.2. Materiales y métodos	18
3.2.1. Sitio experimental	18
3.2.2. Acondicionamiento del área de trabajo	19
3.2.3. Diseño experimental	20
3.2.4. Mediciones de las variables	20

3.2.5. Datos climatológicos	22
3.2.6. Modelo ALMANACMEX	23
3.2.7. Parametrización y calibración del modelo.....	23
3.2.8. Clima y suelo	24
3.2.9. Evaluación del modelo.....	24
3.3. Resultados y discusión.....	25
3.3.1. Biomasa.....	25
3.3.2. Acumulación de Biomasa.....	26
3.3.3. Rendimiento.....	28
3.3.4. Índice de área foliar	30
3.3.5. Condiciones climáticas	31
3.4. Conclusión.....	32
3.5. Agradecimientos.....	32
3.6. Literatura citada.....	32
3.7. Apéndice.....	35

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros estimados para el ajuste entre valores observados y calculados de biomasa (t ha ⁻¹) en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.	26
Cuadro 2. Índice de cosecha en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.	29
Cuadro 3. Parámetros estimados para el ajuste entre valores observados y calculados de rendimiento (t ha ⁻¹) en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.	30
Cuadro 4. Parámetros estimados para el ajuste entre valores observados y calculados de índice de área foliar (LAI) en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	18
Figura 2. Biomasa observada y calculada con el modelo ALMANACMEX en el cultivo de maíz en condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía, bajo tres tratamientos de labranza: labranza cero (L0), labranza mínima (Lm) y labranza convencional (Lc). Cal (calculado) y Obs (observado).....	25
Figura 3. Biomasa acumulada en el cultivo de maíz en condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Mapimí, Durango, México. Labranza cero (L0), labranza mínima (Lm) y labranza convencional (Lc).	27
Figura 4. Rendimiento observado y calculado con el modelo ALMANACMEX en el cultivo de maíz en tres tratamientos de labranza: labranza cero (L0), labranza mínima (Lm) y labranza convencional (Lc). Cal (calculado) y Obs (observado).	28

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1. Datos climáticos en el Municipio de Mapimí, Durango, México, 2023.	35
--	----

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por brindarme el apoyo económico otorgado a través de la beca (CVU 1277419).

A la URUZA-UACH, por brindarme la oportunidad de aprender y crecer, por todo el apoyo brindado, por permitirme continuar con mi formación académica y por todos los recuerdos y lecciones que aprendí durante mis estudios.

Al Dr. Ignacio Sánchez Cohen, por su dirección durante el proyecto, por sus enseñanzas, su apoyo, sabiduría y paciencia en la dirección de esta investigación e impulsarme a ser mejor cada día.

Al Dr. Ricardo Trejo Calzada, por su invaluable orientación, disposición y guía a lo largo de este proceso investigativo. Gracias infinitas por su liderazgo, que ha sido fundamental para el éxito de la tesis y sobre todo gracias por creer en mí y ayudarme a crecer como investigadora.

Al Dr. Adolfo López Pérez muchas gracias por su amabilidad, disponibilidad, observaciones y aportaciones que siempre fueron para mejora del proyecto.

A todos los profesores del posgrado y de la institución que contribuyeron en mi formación, por sus conocimientos, dedicación, compromiso, sabiduría y apoyo constante.

Al personal de la institución que siempre tuvieron la disposición de ayudar de la manera más amable, orientación y colaboración en la resolución de mis necesidades durante mi trayecto académico.

A mis compañeras Sara y Berenice y compañeros Juan y Karim con quienes compartí clases y momentos inolvidables, siempre me apoyaron y me animaron para culminar mi formación académica, muchas gracias por su amistad.

DEDICATORIAS

A mi mamá Rosalía, por ser mi guía. Su amor incondicional y apoyo me han permitido crecer y alcanzar mis metas. Gracias por enseñarme a ser fuerte y nunca rendirme, por nunca dejarme sola aun a la distancia, por siempre darme palabras de aliento y por sus valiosos consejos. Por ti soy la persona que soy ahora, eres mi inspiración y modelo para seguir.

A Fernando mi esposo por ser mi compañero, mi mejor amigo y la persona en la que siempre puedo confiar, quien siempre ha estado para mí, me ha apoyado en todo momento, por su paciencia, comprensión y amor incondicional. Gracias por siempre animarme a lograr mis sueños y por ser ese soporte en mi vida. Agradezco a Dios que te haya puesto en mi camino.

A mi hija Ana Emilia, quien es mi mayor tesoro y regalo que Dios me pudo dar, eres una luz que ilumina mis días, quien me motiva a ser mejor cada día. Gracias por siempre recibirme con un abrazo y alegrarme mis días, por tu paciencia y amor incondicional. Te amo hija.

A mi hermano Fabian, mi compañero de aventuras, quien siempre ha estado para mí cuando lo necesito, quien a la distancia me anima y me hace fuerte.

DATOS BIÓGRAFICOS

Datos personales

Nombre: Ana Cecilia Portillo Baez

Fecha de nacimiento: 10 de septiembre de 1997

Lugar de nacimiento: Sinaloa, Sinaloa

CURP: POBA970910MSLRZN07

Profesión: Ingeniero en Sistemas Agrícolas

Cédula profesional: 12618807



Desarrollo académico

Preparatoria: Universidad Autónoma de Sinaloa, Guamúchil, Salvador Alvarado, Sinaloa (2012 – 2015).

Licenciatura: Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas- Universidad Autónoma Chapingo, Bermejillo, Mapimí, Durango (2015-2020).

Obtuvo el grado por Mérito Académico el 14 de abril de 2021.

Desarrollo profesional

Laboró en la Asociación Ganadera de Nuevo Ideal a principios del 2021 en el Municipio de Nuevo Ideal, Durango. Durante el 2022 laboró como Asesor Técnico A en la Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, URUZA, Bermejillo, Durango.

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ BAJO CONDICIONES LIMITADAS DE DISPONIBILIDAD DE AGUA CON EL MODELO ALMANACMEX

RESUMEN GENERAL

En México, las zonas áridas ocupan el 54% de la superficie del territorio. La degradación del suelo en estas regiones es un problema ambiental vinculado a malas prácticas agrícolas que provocan la erosión del suelo y la pérdida de productividad, siendo los inadecuados sistemas de labranza, una de las principales causas. El objetivo de esta investigación fue evaluar las bondades del modelo ALMANACMEX para predecir los efectos de manejo de labranza sobre la productividad del cultivo de maíz bajo condiciones limitadas de disponibilidad de agua. Para la preparación del terreno, se dispuso de tres tipos de labranza: labranza cero (L0), labranza mínima (LM) y labranza convencional (LC). Las variables medidas fueron precipitación, crecimiento en planta (altura, diámetro de tallo, número de hojas, peso seco, área foliar y, contenido relativo de agua), humedad del suelo e índice de área foliar. Para la simulación del cultivo de maíz se empleó el modelo ALMANACMEX. Los índices estadísticos como error de sesgo medio (MBE) y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) se utilizaron para la evaluación del desempeño del modelo. Como resultados en biomasa se encontró una buena correlación positiva entre los datos observados y calculados ($r = 0.570$). El error de sesgo medio (MBE) comprueba que el modelo tiende a sobreestimar la biomasa en labranza cero y convencional y a subestimar en labranza mínima. La precisión del modelo (RMSE) es satisfactoria en labranza cero, muy buena en labranza mínima y buena en labranza convencional. En cuanto al rendimiento el modelo subestima en los tres tipos de labranza, sin embargo, la precisión del modelo es muy buena en labranza cero y convencional y buena en labranza mínima. Con los resultados de esta investigación, es posible realizar propuestas para el manejo del cultivo de maíz, con enfoque en disponibilidad de agua.

Palabras clave: labranza, simulación, rendimiento de maíz, biomasa.

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas.

Autor: Ana Cecilia Portillo Baez

Director de tesis: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

SIMULATION OF CORN CROP GROWTH AND YIELD UNDER LIMITED WATER AVAILABILITY CONDITIONS USING THE ALMANACMEX MODEL

GENERAL ABSTRACT

Arid regions constitute 54% of Mexico's land area. Soil degradation in these represents a significant environmental challenge, primarily attributed to suboptimal agricultural practices that induce soil erosion and productivity decline, with inadequate tillage systems being a principal contributing factor. This study aimed to evaluate the efficacy of the ALMANACMEX model in predicting the impacts of tillage management on maize productivity under conditions of limited water availability. Three distinct tillage treatments were implemented for soil preparation: no-tillage (L0), minimum tillage (LM) and conventional tillage (LC). Measured variables encompassed rainfall, plant growth parameters (height, stem diameter, leaf number, dry weight, leaf area and relative water content), soil moisture and leaf area index. Maize crop simulation was conducted using the ALMANACMEX model. Model performance was assessed using statical indices, specifically the Mean Bias Error (MBE) and the Root Mean Square Error (RMSE). Regarding biomass a significant positive correlation was observed between observed and simulated data ($r = 0.570$). The Mean Bias Error (MBE) indicated that the model tended to overestimate biomass under no-tillage and conventional tillage, while underestimating it under minimum tillage. Model accuracy (RMSE) was satisfactory for no-tillage, very good for minimum tillage, and good for conventional tillage. Concerning yield, the model consistently underestimated values across all three tillage treatments; however, its accuracy was very good for no-tillage and conventional tillage, and good for minimum tillage. The findings of this research enable the formulation of targeted proposals for maize crop management, with a particular focus on water availability.

Keywords: tillage, simulation, corn yield, biomass.

Master's Thesis in Science, Graduate Program in Natural Resources and Environmental in Arid Zones, Universidad Autónoma Chapingo, Regional University Unit of Arid Zones.

Author: Ana Cecilia Portillo Baez

Advisor: Dr. Ignacio Sanchez Cohen

CAPITULO 1. INTRODUCCION GENERAL

En México, las zonas áridas ocupan el 54% de la superficie y se encuentran principalmente en las regiones norte y centro del país (Briones *et al.*, 2018). De los 32 estados que conforman el territorio mexicano, 25 estados presentan algún grado de aridez en mayor o menor proporción (Perales-Aguilar *et al.*, 2021). Las zonas áridas se caracterizan por que reciben precipitación media anual menor a 350 mm y las semiáridas son aquellas zonas donde se produce lluvia entre los 350 y 600 mm anuales (Tarango, 2005). En estas zonas se puede practicar la agricultura de escorrentía basada en la captación de agua de pequeñas cuencas hidrológicas (Pedroza *et al.*, 2022) y una agricultura de temporal deficiente, conocida como agricultura de secano donde los rendimientos son bajos y la incertidumbre climática es alta (Sánchez *et al.*, 2023).

Las zonas áridas, son ecosistemas que se caracterizan por ser regiones donde la pérdida de agua por evaporación es mayor que la precipitación y las temperaturas son muy extremas (Whitford, 2002; Montaña *et al.*, 2016). Además, la humedad relativa durante la estación seca suele ser baja y se acompaña de fuertes vientos que, combinados con altas temperaturas crean una elevada evapotranspiración (Granados-Sánchez *et al.*, 2013).

Los suelos que reciben precipitaciones insuficientes y retienen carbonatos solubles que a menudo se acumulan debido a la evaporación suelen denominarse “suelos áridos” (Salas, 2000). Los suelos en estas áreas varían en profundidad, textura, pH, conductividad hidráulica y fertilidad, son comunes los suelos incipientes o poco desarrollados (Mazuela, 2013). Estas características hacen que este entorno sea un desafío para la actividad agrícola (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2017).

La degradación del suelo en las regiones áridas es un problema ambiental vinculado a malas prácticas agrícolas que provocan la erosión del suelo y la pérdida de productividad, una de cuyas principales causas son los inadecuados sistemas de labranza (Singh *et al.*, 2020). La labranza en una práctica

mecanizada que se utiliza para remover el suelo y prepararlo para facilitar diversas tareas agrícolas para promover el crecimiento y desarrollo de los cultivos (García *et al.*, 2018a). Esta práctica radica en modificar la estructura del suelo con implementos agrícolas como el arado de discos o de vertedera o con rastra (Arredondo *et al.*, 2003). Las prácticas de labranza tienen diferentes efectos sobre el rendimiento de los cultivos y las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo (Alonso y Aguirre, 2011).

En México, la degradación del suelo afecta 43.56 millones de hectáreas o el 43% de las tierras secas, lo que corresponde al 22.17% de la superficie del país. De todas las tierras secas con degradación de la tierra, las zonas áridas representan el 5%, las zonas semiáridas representan el 61.2% y las zonas áridas semihúmedas representan el 33.8%. De la degradación del suelo según nivel en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de México el 25.5% es moderada, el 14.8% ligera, 1.9% fuerte, 0.7% extrema y el 57.1% sin degradación aparente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013).

Una labranza bien implementada tiene como beneficio la producción de cultivos manteniendo la fertilidad de la materia orgánica del suelo, el nitrógeno, fósforo, potasio, la estructura del suelo y la capacidad de intercambio catiónico, pero el uso intensivo e inadecuado de herramientas de labranza puede llevar a la degradación del suelo (Kirkegaard *et al.*, 2020). La consecuencia más significativa es el impacto que puede generar esta práctica en la erosión del suelo. La labranza puede afectar negativamente a la estructura del suelo y a sus agregados, haciéndolos sueltos, propensos y susceptibles a la erosión. Esto tiene un enorme impacto en la capacidad del suelo para retener agua y soportar condiciones climáticas extremas (Barclay, 2023).

La labranza convencional rompe la compactación del suelo y así ayuda a que las raíces penetren con mayor facilidad, así como también el agua tiene una mayor facilidad de infiltración en el suelo y al mismo tiempo se mejora la extracción de nutrientes (Mendoza, 2021). Sin embargo, en condiciones adversas, puede provocar la degradación del suelo, afectando más las tierras agrícolas. La

labranza convencional ha tendido a aumentar progresivamente el movimiento y la densidad del suelo, lo que ha provocado compactación y una mayor erosión, especialmente en prácticas agrícolas que implican nivelación, labranza y transporte pesado en condiciones de alta humedad (Cadena *et al.*, 2012).

El impacto negativo de la labranza convencional sobre la fertilidad del suelo se puede mitigar mediante el uso de sistemas de labranza menos agresivos, como la labranza mínima y labranza cero (Barut y Celik, 2017). La labranza mínima consiste en reducir al mínimo la labranza en el suelo para establecer un cultivo, manejar las malezas o fertilizar. Este método se sitúa de alguna manera entre la labranza cero y la labranza convencional, así mismo, destaca la importancia de la retención de residuos como un objeto clave (Baker y Saxton, 2009). El método de labranza cero consiste en sembrar cultivos sin arar previamente el suelo. La semilla se deposita en surcos sin alterar el suelo, con el ancho y la profundidad necesarios para asegurar una cobertura adecuada y un buen contacto con el suelo (Riquelme *et al.*, 2021).

Una alternativa para evaluar los diferentes tipos de labranza sin perturbar el suelo son los modelos de simulación de procesos agro-físicos y de cultivo. Candelaria *et al.* (2011) mencionan que los modelos de simulación correctamente evaluados y validados aumentan la eficacia en la investigación, desarrollo agrícola y transferencia de tecnología al poder extrapolar los resultados a otros lugares con características similares y obtener posibles escenarios del funcionamiento del sistema, lo cual posibilita hacer una evaluación antes de implementarla en el sistema real para optimizar el uso de los recursos naturales.

En el ámbito de la simulación agrícola, se han realizado estudios relevantes que analizan el impacto de distintos factores sobre el rendimiento de cultivos. En este sentido, se han estudiado el efecto de las prácticas de manejo y del cambio climático sobre el rendimiento del cultivo de maíz de temporal en las regiones Altos-Sur y Ciénega del estado de Jalisco mediante el modelo de simulación EPIC (Williams, 1990), como lo reportan Flores *et al.* (2014). No obstante, hasta ahora no se dispone de investigaciones que evalúen el rendimiento del maíz bajo

diferentes métodos de labranza utilizando el modelo ALMANACMEX. Por otro lado, Báez *et al.* (2020) aplicaron dicho modelo para evaluar tres variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) establecidas en condiciones de secano y sembradas a distintas densidades, siendo este el único reporte que se tiene con el uso del modelo ALMANAC versión México. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue simular el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz en una zona de temporal deficiente con uso de escorrentía bajo diferentes tipos de labranza, empleando el modelo de simulación de cultivos ALMANACMEX como apoyo en la toma de decisiones sobre aspectos de manejo en una zona representativa del norte árido de México.

La hipótesis planteada fue que el modelo ALMANACMEX puede simular el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz con diferentes métodos de labranza en zonas de limitada disponibilidad de agua como las zonas áridas.

La presente investigación consta de tres capítulos, el primero introduce el tema del trabajo, el segundo proporciona información más detallada que sirva de referencia y el tercero y último es un artículo científico en el que se describe la metodología y resultados obtenidos del trabajo de investigación.

CAPITULO 2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Las zonas áridas

En México, las zonas áridas y semiáridas se encuentran sobre todo en el Norte y Centro del país, abarcando más del 50% del territorio (Briones, 2018). Las zonas áridas y semiáridas coinciden con las áreas climáticas áridas y semiáridas identificadas con el índice de aridez (IA) calculado mediante el método Penman (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] - Universidad Autónoma Chapingo [UACH], 2013).

Las zonas áridas se distinguen por la falta de agua, con una distribución de las precipitaciones altamente irregular, que sucede en escasos eventos y de naturaleza torrencial. La torrencialidad de las precipitaciones en zonas áridas y

semiáridas favorece el arrastre de grandes volúmenes de partículas de suelo, provocando una elevada erosión en las áreas impactadas (Tarango, 2005).

2.2 Agricultura de secano

Se denomina agricultura de secano o de temporal a la agricultura que se practica con el aprovechamiento de las precipitaciones. Los territorios con adopción de agricultura de temporal ocupan el 41% de la superficie terrestre mundial y contribuyen con la producción de alimentos al 40% de la población mundial (Reynolds *et al.*, 2007). En México se practica en gran parte de las zonas semiáridas del Centro-Norte del país, principalmente en los cultivos de frijol, maíz y cereales (García *et al.*, 2018b).

La agricultura de secano suministra alrededor del 60% de los alimentos en el mundo, lo que la hace muy importante para la alimentación global. Sin embargo, su potencial depende mucho de la distribución de la lluvia, la cual puede ser deficiente, sobre todo en las zonas áridas (Food and Agricultura Organization [FAO], 2002).

En el Estado de Durango se practica la agricultura de temporal en todo el territorio, sin embargo, la climatología favorece solo a una parte del estado (Sánchez *et al.*, 2023). En 2023 las precipitaciones de mayo a septiembre, periodo más importante en el ciclo agrícola de temporal en México estuvieron por debajo de la media histórica, los niveles de lluvia registrados para el estado de Durango son de 200 a 400 mm, equivalentes a índices de humedad agrícola deficientes y muy deficientes (Villalpando, 2023).

2.3 Efecto de la labranza en el suelo

La reducción de la productividad en los cultivos registra incrementos sistemáticos a causa de la degradación del suelo, ocasionada por la explotación excesiva, los altos niveles de deforestación, la eliminación de la cubierta vegetal y el excesivo laboreo del suelo (Navarro *et al.*, 2000). La labranza es una práctica que rompe el suelo favoreciendo la erradicación de malezas y la aireación de la tierra. Este

enfoque genera ventajas a corto plazo, pero frecuentemente conlleva repercusiones a largo plazo (Barclay, 2023).

Labrar el suelo con herramientas tradicionales como el arado de discos o de vertederas, es una práctica agrícola que, según estudios, podría provocar erosión, compactación, pérdida de humedad y un incremento en los gastos de producción si se emplea de manera excesiva (Navarro *et al.*, 2000). La labranza intensiva causa la disminución de la materia orgánica del suelo, reduciendo la existencia de microorganismos útiles, nutrientes y la habilidad del suelo para acumular carbono; en este procedimiento, se modifican las características intactas del suelo, lo que impacta su estructura global, suprime nutrientes y altera la composición de la materia orgánica del mismo (Sanz, 2023).

Uno de los tratamientos más efectivos contra el deterioro de las tierras es la agricultura de conservación, un método innovador de cultivo en el que no se hace un laboreo en el suelo. Este principio surge directamente de la constatación de que la agricultura mecánica está contribuyendo a la degradación de los terrenos de manera generalizada (Rodríguez *et al.*, 2015). Las características físicas del suelo son elementos que establecen la disponibilidad de oxígeno y el flujo de agua en él, determinando los métodos agrícolas a emplear y la producción de la cosecha; no obstante, estas características no están exentas de los impactos generados por diversos métodos de cultivo, generando alteraciones en el entorno físico del terreno (López *et al.*, 2010).

En México, el deterioro del suelo es un asunto crítico que impacta a más del 64% del territorio nacional, pese a su considerable variedad de suelos, lo que amenaza la habilidad de los suelos para ofrecer servicios ecosistémicos vitales (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2023). Se ha evidenciado que la erosión ocasionada por la labranza es tan dañina como la erosión hídrica, dado que es más susceptible el suelo al fracturar los agregados del suelo de manera más homogénea, incrementando la erodabilidad, incluso con lluvias de escasa fuerza (Gómez-Calderón *et al.*, 2018). La disminución de la labranza en la producción de cultivos es un elemento verdaderamente relevante ya que la

calidad del suelo se está deteriorando progresivamente en los sistemas de agricultura tradicional. Al continuar con la labranza de manera intensiva el suelo pierde su estructura, se disminuye la materia orgánica y la filtración del agua (Morales, 2023).

2.4 Modelo

A lo largo de los siglos se han aplicado y diseñado modelos para el desarrollo de la ciencia; sin embargo, las medidas relacionadas con los procesos agrícolas y ambientales sólo se han implementado en las últimas décadas (Gormley y Sinclair, 2003). Un modelo es una representación simplificada de un sistema que utiliza símbolos, diagramas y ecuaciones para describir las variables dependientes e independientes de interés, sus características y restricciones. Estos pueden ser descriptivos o de simulación, los primeros representan sólo los componentes del sistema, mientras que los segundos simulan el funcionamiento del sistema y obtienen los resultados previstos en forma de datos numéricos o gráficos (Candelaria *et al.*, 2011).

Un modelo es un bosquejo que ilustra un conjunto real con un cierto nivel de exactitud y de la manera más integral posible, sin el objetivo de proporcionar una copia de lo que se encuentra en la realidad (Hernández *et al.*, 2009).

2.5 Modelo de Simulación

Un modelo de simulación es un conjunto de ecuaciones que describe los procesos, variables y relaciones entre estas en un fenómeno real y proporciona indicaciones aproximadas del comportamiento bajo diferentes controles de las variables (Pérez *et al.*, 2006). Los modelos de simulación de cultivos son una categoría de modelos ambientales que normalmente predicen los rendimientos de los cultivos, el crecimiento y desarrollo de las plantas, la humedad del suelo, nutrientes y otras variables (Soto *et al.*, 2004).

2.6 Importancia de los modelos de simulación para la agricultura

Los modelos son una herramienta poderosa, que con el avance de la tecnología computacional permiten analizar diferentes escenarios de manera fácil, rápida y

a un bajo costo, proporcionando información de relevancia para la toma de decisiones (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2022). Debido a los beneficios que tiene el modelado en el estudio de sistemas y la importancia de la agricultura para el desarrollo humano y uso de los recursos naturales, se ha implementado el uso de modelos de simulación para su estudio, planeación y representación con el fin de lograr la optimización de los recursos y una producción eficiente y sostenible (Candelaria *et al.*, 2011).

2.7 Calibración

Durante el proceso de calibración, se ajustan los parámetros en la base de datos del modelo (i) mediante una serie de escenarios simulados hasta conseguir un ajuste aceptable entre los valores simulados y los observados mediante un experimento de campo, y (ii) basándose en datos experimentales que se encuentran en la literatura para el sitio de estudio a validar (Soto y González, 2019).

2.8 Validación

El proceso de validación se refiere a la evaluación del rendimiento del modelo, comparando los valores simulados de una variable específica con datos reales producto de un experimento en campo. Por esta razón, la finalidad primordial al evaluar el rendimiento de un modelo de simulación de cultivos es apreciar su utilidad práctica como instrumento de investigación y soporte en la toma de decisiones en aspectos de gestión y planificación a escala de finca, regional o nacional (Soto y González, 2019).

2.9 Literatura citada

- Alonso B., M., y Aguirre M., J. F. (2011). Efecto de la labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 113-121. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000200113&lng=es&tlng=es.
- Arámbula, L. T. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17-21.

- Arredondo A., J.J., Ortiz L., H., Rössel K., D. y Morales G., D. (2003). Evaluación del desempeño de tres tipos de arado de tiro animal. *Agrociencia* 37(2): 187-194.
- Báez G., A. D., Fajardo D., R., García R., G., Osuna C., E., Kiniry, J. R., y Meki, M. N. (2020). High Sowing Densities in Rainfed Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in Mexican Semi-Arid Highlands under Future Climate Change. *Agronomy*, 10(3), 442. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10030442>
- Baker, J. y Saxton, K. E. (2009). *Los ¿qué? Y los ¿por qué? de la agricultura con labranza cero*. En Baker, C. J. y Saxton, K. E. (Eds). *Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación* (1-12 pp). FAO.
- Barclay A. (12/09/2023). *Labrar o no labrar: Un debate abierto*. Climate Farmers. <https://www.climatefarmers.org/es/blog/labrar-o-no-labrar-un-debate-abierto/>
- Barut Z. y Celik I. (2017). Tillage effects on some soil physical properties in semi-arid Mediterranean region of Turkey. *Chemical Engineering Transactions* 58:217-222. doi:10.3303/CET1758037.
- Basurto-Lozada, D., Hillier, A., Medina, D., Pulido, D., Karaman, S., y Salas, J. (2020). Dynamics of soil surface temperature with unmanned aerial systems. *Pattern Recognition Letters*, 138, 68-74.
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez Y., A., Pavón, N. y Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y bosques*, 24(spe), e2401898. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Cadena, B. P.; Egas, D.; Ruiz, H.; Mosquera, J. y Benavides, O. (2012). "Efecto de cinco sistemas de labranza, en la erosión de un suelo vitric haplustand, bajo cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.).", *Rev. Ciencias Agrícolas*, vol. 29, núm. 2, pp. 116-128.
- Candelaria M., B., Ruiz R., O., Gallardo L., F., Pérez H., P., Martínez B., A., y Vargas V., L. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(3), 999-1010.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) - Universidad Autónoma Chapingo (UACH). (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación*. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma de Chapingo. Zapopan, Jalisco.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2002). *Agua y cultivos: logrando el uso óptimo del agua en la agricultura*. Organización de las Naciones Unidas

para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
https://www.fao.org/4/y3918s/y3918s09.htm#P0_0

- Flores L., H. E.; Ruíz C., J. A.; Mora O., C.; De la, Zarazúa V., P., Chávez Durán, Á. A.; Ramírez Vega, H. y Velásquez V., M. A. (2014). Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano en maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(SPE10), 2007–2020.
- García, D., J. Cárdenas, y Silva, A. (2018a). Evaluación de sistemas de labranza sobre propiedades físicoquímicas y microbiológicas en un inceptisol. *Revista de ciencias agrícolas* 34(1):16-25. doi:10.22267/rcia.183501.79
- García H., R.V., Garibaldi M., F., Osuna C., E.S., Martínez R., E. y Borja B., M. (2018b). *Sembradora neumática para siembra de granos finos en camas*. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Pabellón. INIFAP. Folleto Técnico Núm. 77. Aguascalientes, México. 32 p.
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K. & Solorzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 167-177. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- Gormley H., L. L. y Sinclair, L.F. 2003. Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Latina. *Agroforestaría en las Americas*, 10: 103-108.
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. A., Vázquez-Alarcón, A. y Ruíz-Puga, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 45-66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>
- Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30 (1), 73-82.
- Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria (INIFAP). (2022). *Estructura y uso de modelos de simulación de cultivos (MSC)*. INIFAP. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/estructura-y-uso-de-modelos-de-simulacion-de-cultivos-msc>
- Kirkegaard, J., Kirkby, C., Oates, A., Van der Rijt, V., Poile, G. & Conyers, M. (2020). Strategic tillage of a long-term, no-till soil has little impact on soil characteristics or crop growth over five years. *Crop and Pasture Science* 71(12):945 - 958. doi:10.1071/cp20334

- López M., J.D., Vázquez V., C., Salazar S., E., Zúñiga T., R., & Trejo E., H.I. (2010). *Sistemas de labranza y fertilización en la producción de maíz forrajero*. Phytón (Buenos Aires), 79(1), 47-54.
- Mazuela A., P. C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Arica)*, 31(2), 3-4. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Mendoza M., M.A. (2021). *Efectos de la labranza convencional y labranza de conservación en la producción agrícola: Revisión de literatura*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 43 p.
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García O., F., García S., R., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia T., Y., Troyo, E., & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34, 39-59.
- Morales G., F. (10 abril 2023). *¿Por qué el mínimo movimiento del suelo favorece la salud del planeta?*. CIMMYT. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/porque-el-minimo-movimiento-del-suelo-favorece-la-salud-del-planeta/>
- Navarro B., A., Figueroa S., B., Ordaz C., V. M., & González C., F. V. (2000). Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra Latinoamericana*, 18(1), 61-69.
- Pedroza-Sandoval A., Sánchez Cohen I. y Trejo Calzada R. (2022). *Captación de agua de lluvia para zonas con déficit hídrico. Agenda digital en plataforma Python*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. de México. Primera Edición. 27 p. www.researchgate.net
- Perales-Aguilar, L., Esquivel-Rivera, J. A., Silos-Espino, H., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Perales-Segovia, C. (2021). Tolerancia de plantas de zonas áridas a metales pesados. *Revista Terra Latinoamericana*, 39:1-8. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.759>
- Pérez, M. O., Delfín, C, Fregoso, A. y H. Cotler. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 78: 65-84.
- Reynolds, J., Stafford S., M., Lambin, E., Turner, B.L., Mortimore, M., Batterbury, S. Downing, T., Dowlatabadi, H., Fernández, R., Herrick, J., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F., Ayarza, M. y Walker, B. (2007). Ecology: Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*. 316(5826): 847-851. [10.1126/science.1131634](https://doi.org/10.1126/science.1131634).

- Riquelme, J., Yoshikawa S. y Aliaga, C. (2021). *Cero labranza, principios y equipamientos*. 247-267 pp. FAO: Chile. <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1678160/>
- Rodríguez G., A., Arcia P., J., Martínez C., J. A., García L., J., Cid L., G., & Fleites C., J. (2015). Los sistemas de labranza y su influencia en las propiedades físicas del suelo. *Revista Ingeniería Agrícola*, 5 (2), 55-60.
- Salas J.D. (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería del agua*. 7 (4): 409–429. <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2855>
- Sánchez C. I., Jiménez J. S. I. Trejo C. R., Pedroza S. A., Miranda R. J. A., Inzunza I. M. A. y Gramillo Á. I. (2023). *Manejo de siembras en la agricultura de temporal deficiente para el Estado de Durango, México*. CENID-RASPA INIFAP. Secretaría de Agricultura. 75 p.
- Sanz, I. (2023). *Gestionando la salud del suelo con la labranza de conservación*. <https://blog.eagronom.com/es/gestionando-la-salud-del-suelo-con-la-labranza-de-conservaci%C3%B3n>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (17 junio 2017). *Agricultura en zonas áridas, el reto de producir*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/agricultura-en-zonas-aridas-el-reto-de-producir>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental*. Edición 2012. México. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_2.html
- Singh, D., S. Lenka, N.K. Lenka, S. K. Trivedi, S. Bhattacharjya, S. Sahoo, J.K. Saha, and A.K. Patra. (2020). Effect of reversal of conservation tillage on soil nutrient availability and crop nutrient uptake in soybean in the Vertisols of Central India. *Sustainability* 12:6608. doi:10.3390 / su12166608
- Soto B., F. & González L., M. I. (2019). Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana*.30(2): 517-534. doi:10.15517/am.v30i2.33839.
- Soto, O.; Galvéz, G. y Sigarroa, A. (2004). *Estudio y modelación de algunas variables que influyen en el rendimiento agrícola de la caña de azúcar*. Evento ATAC.

- Tarango A., L. A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, IV(2), 17–21. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455545052003>
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (28 junio 2023). *UNAM alerta: 64% de los suelos de México en estado crítico*. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/unam-alerta-64-de-los-suelos-de-mexico-en-estado-critico/
- Villalpando F. (31 octubre 2023). *Impacto del temporal de lluvias en la agricultura de México en 2023*. ClimaproAgro: Información climática para la agricultura. <https://www.climaproagro.com/blog/vrilejawffkw8rvabb7rzeookhm3kv#:~:text=Las%20precipitaciones%20registradas%20en%20el%20periodo%20de%20mayo%20a%20septiembre,100%25%20en%20%C3%A1reas%20puntuales%20del>
- Whitford, W. G. (2002). *Ecology of desert systems*. Academic Press. Book ISBN: 9780080504995.
- William, J.R. (1990). *EPIC- Erosion Productivity Impact Calculator*. Model Documentation. Vol. 2. User Manual. Submitted as USDA-ARS. Technical Bulletin. 236 p.

CAPITULO 3. SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ EN ZONAS ÁRIDAS CON DIFERENTES MÉTODOS DE LABRANZA MEDIANTE EL USO DEL MODELO ALMANACMEX

**Simulation of corn crop growth and yield in arid zones with different tillage
methods using the ALMANACMEX model**

Ana Cecilia Portillo-Baez¹ (0009-0003-2538-5533), Ignacio Sánchez-Cohen^{2*} (0000-0002-9063-7114), Ricardo Trejo-Calzada¹ (0000-0003-1670-7847), Adolfo López-Pérez³ (0000-0002-4614-5032)

*Corresponding author: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

¹Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Carretera Gómez Palacios-Cd. Juárez, Chih. Bermejillo, km 40 C.P. 35230, Bermejillo, Durango.

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Canal Sacramento, kilómetro 6.5, Zona Industrial, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango.

³ Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco. C. P. 56264. Estado de México.

Revista: ERA (Ecosistemas y Recursos Agropecuarios)
Estatus: Enviado

Resumen

Los modelos de simulación de cultivos son una herramienta que sirve para estudiar el crecimiento y rendimiento de los cultivos en condiciones climáticas, hídricas y manejo agronómico diferentes. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta del cultivo de maíz con diferentes tipos de labranza, empleando el modelo de simulación de cultivo ALMANACMEX como herramienta de investigación y apoyo en la toma de decisiones en aspectos de manejo. Este modelo se calibró y validó con datos observados y simulados de biomasa, índice de área foliar y rendimiento de grano para simular el desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz bajo tres tipos de labranza: labranza cero (L0), labranza mínima (LM) y labranza convencional (LC). Como resultado, el modelo tiende a sobreestimar el valor de la biomasa en la labranza cero (MBE=1.80), subestimar en labranza mínima (MBE=-0.3) y sobreestimar en labranza convencional (MBE=0.63). En cuanto a la precisión, en labranza cero el modelo predice de manera satisfactoria (RMSE=1.34), en labranza mínima es muy buena (RMSE=0.54) y en labranza convencional es buena (RMSE=0.79). En los tres tipos de labranza el modelo subestimó el rendimiento, sin embargo, la precisión del modelo es muy buena en labranza cero (RMSE=0.46) y convencional (RMSE=0.70) y buena en labranza mínima (RMSE=1.0). El modelo de simulación ALMANACMEX puede proyectar la producción de biomasa y el rendimiento del cultivo de maíz en diferentes tipos de labranza, sin embargo, es recomendable que éste se calibre con datos observados para garantizar que las proyecciones de rendimiento sean confiables.

Palabras clave: labranza convencional, labranza mínima, labranza cero, modelo de simulación

Abstract

Crop simulation models are a tool used to study crop growth and yields under different climatic, water and agronomic management conditions. The objective of the present work was to evaluate the response of the corn crop with different types of tillage, using the ALMANACMEX crop simulation model as a research and decision support tool in management aspects. Thus, the model was calibrated and validated with observed and simulated data of biomass, leaf area index and grain yield to simulate the development and yield of the corn crop with three types of tillage: no-tillage (L0), minimum tillage (LM) and conventional tillage (LC). As a result, the model tends to overestimate the biomass value in no-tillage (MBE=1.80), underestimate in minimum tillage (MBE=-0.3) and overestimate in conventional tillage (MBE=0.63). Regarding accuracy, in no-tillage the model predicts satisfactorily (RMSE=1.34), in minimum tillage it is very good

(RMSE=0.54) and in conventional tillage it is good (RMSE=0.79). In the three types of tillage the model underestimated the yield, however, the accuracy of the model is very good in no-tillage (RMSE=0.46) and conventional tillage (RMSE=0.70) and good in minimum tillage (RMSE=1.0). The ALMANACMEX simulation model can project biomass production and yield of the corn crop under different tillage types, however, it is recommended that the model be calibrated with observed data to ensure that yield projections are reliable.

Keywords: conventional tillage, minimum tillage, zero tillage, simulation model

3.1. Introducción

En muchos países, la producción intensiva de cultivos ha provocado la degradación de los suelos, poniendo en riesgo la producción futura en dichas zonas. Los suelos en buen estado son esenciales para establecer sistemas de cultivo sostenibles que puedan resistir a los impactos del cambio climático (FAO, 2022). Las tierras degradadas muestran una disminución en su capacidad para resistir otras perturbaciones naturales, como el viento y el agua, lo que lleva a la erosión del suelo. Esto resulta en un uso más intensivo de maquinaria pesada, lo que puede ocasionar la compactación del suelo; esta condición reduce su capacidad para absorber agua, lo que incrementa la demanda de riego y la aplicación de nutrientes (Sanz, 2023).

La agricultura es el agente principal responsable de la perturbación del suelo, la modificación subsiguiente de su estructura y la degradación consiguiente. La labranza intensiva puede tener consecuencias negativas en la composición del suelo y provocar una desintegración excesiva de los agregados, lo que resulta en la posibilidad de desplazamiento del suelo debido a la erosión (Reicosky y Saxton, 2009).

Las causas de la degradación de la tierra en el país están relacionadas con una variedad de actividades: el 77.4% de la superficie terrestre degradada está relacionada con la agricultura y la ganadería (38.7% cada una) y el 16.4% con la pérdida de vegetación. El resto se reparte entre urbanización, sobreexplotación de la vegetación y actividades industriales (SEMARNAT, 2016).

Una alternativa a esta problemática es evaluar los sistemas de labranza del suelo con modelos, los cuales vienen a dar un panorama del comportamiento que podrían tener los cultivos en el mundo real sin tener que llevar a cabo dichas actividades de manejo, lo cual facilitaría la optimización de los recursos naturales, económicos y humanos. Candelaria *et al.* (2011) mencionan que un modelo es una representación simplificada de un sistema que utiliza símbolos, diagramas y ecuaciones para describir las variables dependientes e independientes de interés, sus características y restricciones; estos pueden ser descriptivos o de simulación, los primeros representan sólo los componentes del sistema, mientras que los segundos simulan el funcionamiento del sistema y obtienen los resultados previstos en forma de datos numéricos o gráficos.

Un modelo de simulación es un conjunto de ecuaciones que describe los procesos, variables y relaciones entre estas en un fenómeno real y proporciona indicaciones aproximadas del comportamiento bajo diferentes controles de las variables (Pérez *et al.*, 2006). Los modelos de simulación de cultivos son una categoría de modelos ambientales que normalmente predicen los rendimientos de los cultivos, el crecimiento y desarrollo de las plantas, la humedad del suelo, nutrientes y otras variables (Soto *et al.*, 2004).

En diversos estudios se ha empleado la modelación agroclimática para estimar el rendimiento de cultivos en distintas regiones. Por ejemplo, en el norte de Sinaloa se simuló el rendimiento del cultivo de maíz utilizando el modelo AquaCrop, con resultados reportados por Flores-Gallardo *et al.* (2013). De manera similar, en la región Sur de la Habana, López *et al.* (2009) evaluaron la eficiencia de un modelo de simulación para predecir el rendimiento de maíz. Más adelante, se exploró el impacto de las prácticas de manejo y del cambio climático sobre el rendimiento de maíz de temporal en las regiones Altos-Sur y Ciénega de Jalisco, utilizando el modelo EPIC (Williams, 1990) como lo documentan Flores *et al.* (2014).

No obstante, hasta el momento no se han encontrado estudios que evalúen el rendimiento del cultivo de maíz bajo diferentes métodos de labranza mediante el

modelo ALMANACMEX. En contraste, Báez *et al.* (2020) utilizaron esta herramienta para evaluar tres variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de secano y a distintas densidades de siembra, siendo el único trabajo conocido con la versión mexicana del modelo ALMANAC. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta del cultivo de maíz con diferentes tipos de labranza, empleando el modelo de simulación de cultivo ALMANACMEX como herramienta de investigación y apoyo en la toma de decisiones en aspectos de manejo.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Sitio experimental

El experimento se estableció en el ejido La Purísima, municipio de Mapimí, Durango, México. Geográficamente se encuentra en las coordenadas latitud 25°52'19.48" norte y longitud 103°42'52.15" oeste y una altitud de 1191 metros. Se localiza dentro de la región hidrográfica Nazas-Aguanaval.

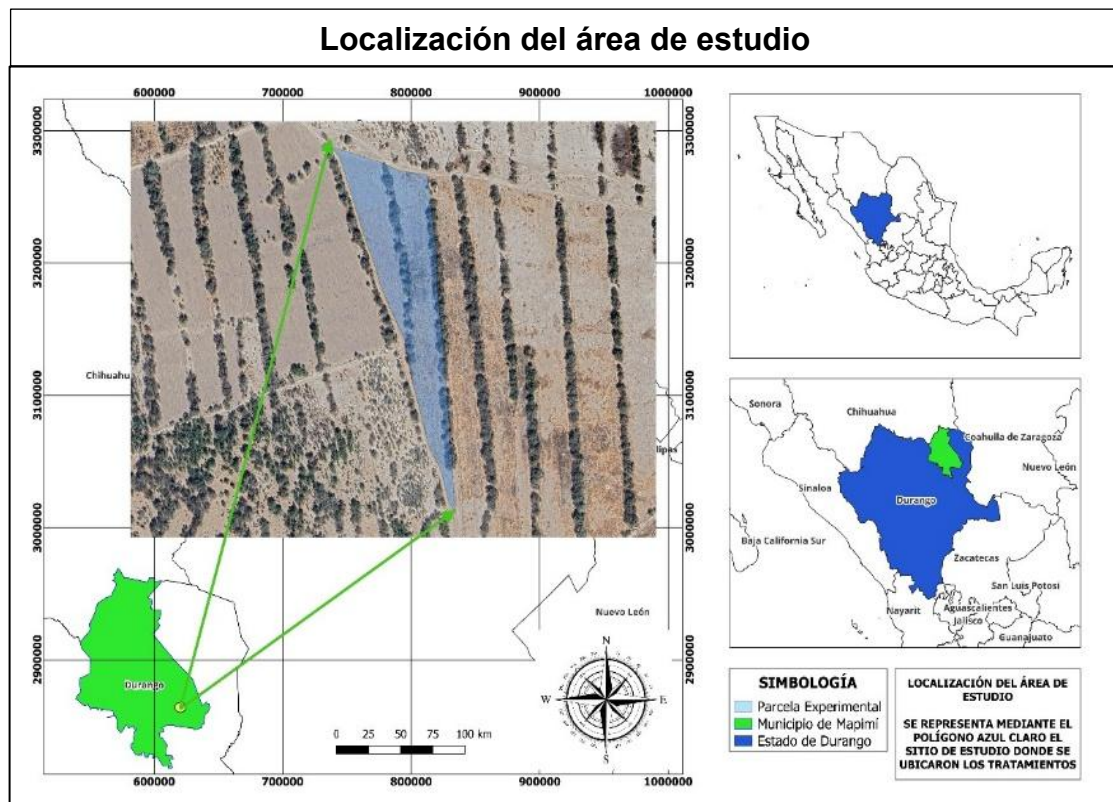


Figura 1. Localización del área de estudio.

El sitio presenta una precipitación media anual en un rango que va de los 125 mm a los 400 mm, teniendo lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Según la clasificación de climas de Koppen el área de estudio presenta un clima BWhw, lo cual indica que se encuentra en un lugar árido, semicálido con temperatura media anual entre 18 °C y 22 °C, la temperatura del mes más frío es menor de 18 °C, la temperatura del mes más caliente es mayor de 22 °C (CONABIO, 2023).

3.2.2. Acondicionamiento del área de trabajo

La siembra de maíz se realizó el 15 de julio del 2023 en una zona de temporal deficiente con uso de escorrentía. Cabe mencionar que este ciclo de siembra se caracterizó por ser muy seco, lo cual afectó al momento de la siembra, el crecimiento y desarrollo del cultivo y por lo tanto el rendimiento.

La variedad de maíz que se utilizó es criolla de la región, se estableció a campo abierto, en surcos, a una distancia entre surcos de 70 cm y una distancia entre planta de 15 cm, lo que dio un promedio de 6.6 semillas por metro lineal y una densidad de siembra de 95238 plantas ha⁻¹. Para la preparación del terreno previa a la siembra se dispuso de tres tipos de labranza, los cuales fueron los tratamientos:

Labranza convencional (LC): Consiste en las prácticas de manejo que comúnmente realizan los productores de zonas áridas; básicamente incluye un barbecho a 30 cm de profundidad con arado de discos (CODELBA, SKU:2846, México) con el fin de remover e incorporar malas hierbas, voltear el suelo y romper el ciclo biológico de algunas plagas que pudieran quedar del cultivo anterior, además de darle uniformidad al terreno, aumentar la aireación y la infiltración del agua precipitada. Posteriormente se realiza un rastreo con una rastra de 20 discos (Bison, RIB-20-22, USA) con el fin de desmenuzar los terrones que quedaron después de realizar el barbecho.

Labranza mínima (LM): Este tipo de labranza consiste en solo un rastreo con el fin de remover de manera superficial el suelo.

Labranza cero (L0): Este sistema no utiliza maquinaria, es decir, se realiza la siembra sin remover el suelo.

3.2.3. Diseño experimental

Se estableció un experimento con diseño de bloques completos aleatorizados con 3 tratamientos (labranza convencional, labranza mínima y labranza cero) y 3 repeticiones. Se tomaron 3 plantas por tratamiento por repetición. El muestreo fue destructivo. Cada unidad experimental fue delimitada por un largo de 30 m y un ancho de 15 m.

3.2.4. Mediciones de las variables

Las variables se midieron cada 15 días durante el crecimiento y desarrollo del cultivo, sin embargo, cuando el suelo estaba saturado no se podía entrar a las parcelas y el muestreo se realizó el día que la humedad lo permitió.

3.2.4.1. Precipitación pluvial

Las mediciones de precipitación en la cuenca iniciaron en el año 2023 con el primer evento de lluvia presentado. Para medir los eventos de lluvia dentro de la cuenca, se instaló un pluviómetro (HOBO - Tipping-Bucket®, Australia) con una programación de registros cada 10 minutos en temporada de lluvia y cada hora para el resto del año, los pluviómetros tienen una precisión de 0.2 mm por pulso y una capacidad de registrar intensidades de lluvia de hasta 127 mm h⁻¹.

3.2.4.2. Humedad del suelo

Para medir la humedad del suelo se tomaron muestras de suelo a 15 cm de profundidad, se tomó el peso húmedo y se llevaron las muestras a la estufa de secado a 105 °C durante 24 horas, donde posteriormente se tomó el peso seco. La fórmula para determinar el contenido de humedad del suelo fue la siguiente (Aguilera y Martínez, 1996):

Ecuación 1

$$P_s = \left(\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right) * 100$$

Donde:

Ps=Contenido de humedad (%),

Pss=Peso de suelo seco (g), y

Psh=Peso de suelo húmedo (g).

3.2.4.3. Índice de área foliar

Para medir el índice de área foliar se empleó el (LAI 2000 Plant Canopy Analyzer LI-COR®, USA) el cual utiliza un método no destructivo para medir de manera fácil y precisa el índice de área foliar (LAI). El LAI-2000 Plant Canopy Analyzer calcula el índice de área foliar y otros atributos de la estructura del dosel a partir de mediciones de radiación realizadas con un sensor óptico de ojo de pez (148° campo de visión).

3.2.4.4. Altura del cultivo

Para medir la altura del cultivo se empleó una cinta métrica de 3 metros con graduación en cm (Truper®, FCG-3M, China).

3.2.4.5. Número de hojas

Las mediciones del número de hojas se hicieron de forma visual en cada planta muestreada a partir de los 15 días después de su emergencia.

3.2.4.6. Diámetro del tallo

Las mediciones del diámetro de tallo se hicieron con un calibrador vernier digital pie de rey 0.01 mm 150 mm (SoulFox, vern-calp, México).

3.2.4.7. Peso seco

Se tomaron tres plantas por tratamiento y se llevaron al laboratorio donde se pusieron en una estufa de secado a 62° por 24 horas y posteriormente se tomó el peso empleando una báscula de pesaje digital 0.01 g – 5000 g (Vikye, China).

3.2.4.8. Contenido relativo de agua

Para medir el contenido relativo de agua (CRA) fue necesario cortar la hoja o tomar una muestra de la hoja en forma de disco. Primero se pesó la muestra con una balanza digital para obtener el peso fresco (PF). Para determinar el peso turgente (PT) la muestra se colocó en una caja Petri con agua destilada suficiente para que se cubriera completamente la muestra, se dejó por 3 o 4 horas hasta que logró alcanzar la turgencia máxima, se quitó el exceso de agua de la muestra con papel y posteriormente se llevó a pesar de igual manera con una balanza digital. Finalmente, para obtener el peso seco (PS) se llevó a la estufa de secado a una temperatura de 62 °C /hasta que alcanzó un peso constante. La fórmula del CRA se expresa en porcentaje (Azcón y Talón, 2008).

Ecuación 2

$$CRA = \left(\frac{PF - PS}{PT - PS} \right) * 100$$

Dónde:

PF: peso fresco de la muestra,

PS: peso seco de la muestra, y

PT: peso turgente de la muestra.

3.2.4.9. Peso seco de raíz

Se tomaron las raíces de tres plantas por tratamiento y se llevarán al laboratorio donde se pusieron en una estufa de secado a 62°C por 24 horas y posteriormente se tomó el peso con una balanza analítica.

3.2.5. Datos climatológicos

Los datos climatológicos para obtener los datos simulados en el modelo se obtuvieron de la estación climatológica 10045 del municipio de Mapimí en el estado de Durango, en México. Se ubica entre las coordenadas latitud 25°49'56" N y longitud 103°50'48" W a una altura de 1,388 metros sobre el nivel del mar.

Los datos que se tomaron de la estación climatológica fueron temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación y radiación solar.

3.2.6. Modelo ALMANACMEX

Una versión del modelo de simulación ALMANAC por sus siglas en inglés (Agricultural Land Management Alternatives with Numerical Assessment Criteria Model) (Kiniry, 2019) es el ALMANACMEX (ALMANAC México). Tiene una interfaz que permite el uso de datos de clima, suelo y manejo de México en la simulación de los cultivos. Fue creado para facilitar a los investigadores y técnicos del sector agropecuario en México el uso del modelo. El ALMANACMEX es un modelo de cultivo producto de una colaboración binacional e interinstitucional entre investigadores del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) de México y del USDA-ARS (United States Departamento of Agriculture- Agricultural Research Service) de Estados Unidos. Este modelo consta de una base de datos del clima con información de parámetros mensuales y diarios de más de 3,000 estaciones climatológicas de México. Los datos del suelo están conformados por información referente a los tipos de suelo en áreas de uso agrícola, forestal y pecuario de México y sus características físicas y químicas de estos. Los datos del cultivo tienen información de más de 80 cultivares, información que puede ser cambiada y adaptada a los cultivos que existen en México (Báez-González *et al.*, 2016).

3.2.7. Parametrización y calibración del modelo

Para realizar la parametrización del modelo ALMANACMEX se tomaron los datos de las variables medidas en campo, las cuales fueron descritas anteriormente. La captura de datos se realizó en el programa Excel del paquete de Microsoft Office ®.

La calibración del modelo se realizó comparando los resultados obtenidos del modelo de simulación con los datos observados en campo; estos datos incluyeron la biomasa, área foliar y rendimiento.

3.2.8. Clima y suelo

Se utilizó la información climática mediante el HOBO descrito anteriormente; adicionalmente, se utilizó información registrada de la estación climatológica 10045 Mapimí. Con respecto al suelo se utilizó información del análisis de laboratorio fisicoquímico del perfil del suelo del área de estudio que se realizó en el laboratorio del INIFAP CENID RASPA unidad Gómez Palacio, Durango.

3.2.9. Evaluación del modelo

La evaluación del modelo se realizó considerando el rendimiento de semilla, la biomasa y las condiciones climáticas diarias (temperatura máxima y mínima y precipitación) observadas durante 2023 en el Ejido La Purísima, Mapimí, Durango bajo condiciones de temporal deficiente con escorrentía. El pluviómetro donde se colectaron los datos se estableció dentro de la parcela.

Los índices estadísticos error de sesgo medio (MBE) y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) se utilizaron para la evaluación del desempeño del modelo de simulación ALMANACMEX. El MBE del rendimiento de semilla y biomasa se calculó considerando la diferencia entre el rendimiento de semilla y biomasa observado y simulado, utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (si - oi)$$

Donde N es el número de observaciones usadas para la comparación, Si y Oi son el rendimiento de la semilla y biomasa simulado y observado.

La raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) fue usado para determinar la diferencia entre el rendimiento de la semilla y biomasa simulado y observado.

Ecuación 4

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (Si - Oi)^2}$$

Donde N es el número de observaciones usadas para la comparación, Si y Oi son el rendimiento de la semilla y biomasa simulado y observado.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Biomasa

En la Figura 2 se puede observar que los datos calculados de biomasa en el cultivo de maíz bajo las condiciones del experimento fueron muy parecidos a los datos observados y de hecho se encontró una buena correlación positiva entre los datos observados y calculados ($r = 0.570$). Sin embargo, se puede observar que el modelo tiende a sobreestimar el valor de la biomasa en la labranza cero, pasando de un valor observado de (2.61 t ha^{-1}) a un valor calculado de (3.99 t ha^{-1}). En la labranza mínima se acerca en mayor medida el valor observado (4.09 t ha^{-1}) con el valor calculado (4.03 t ha^{-1}). Por último, en la labranza convencional el acercamiento fue un poco menor que en la labranza mínima, dando como resultado un valor observado de (3.90 t ha^{-1}) y un valor calculado de (4.18 t ha^{-1}).

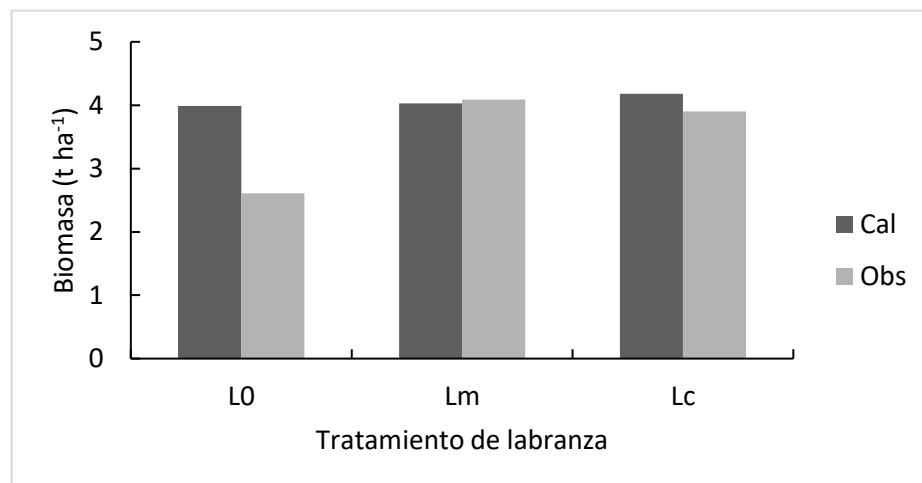


Figura 2. Biomasa observada y calculada con el modelo ALMANACMEX en el cultivo de maíz en condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía, bajo tres tratamientos de labranza: labranza cero (L0), labranza mínima (Lm) y labranza convencional (Lc). Cal (calculado) y Obs (observado).

En el Cuadro 1 se puede observar que el error de sesgo medio (MBE) comprueba que el modelo tiende a sobreestimar la biomasa en labranza cero, a subestimar en labranza mínima y sobreestimar en labranza convencional. La raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) indica la precisión del modelo. En labranza cero el modelo predice de manera satisfactoria, en labranza mínima la precisión del modelo es muy buena y en labranza convencional la precisión es buena.

Cuadro 1. Parámetros estimados para el ajuste entre valores observados y calculados de biomasa (t ha⁻¹) en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal

Tratamiento	MBE	RMSE
Labranza Cero	1.80	1.34
Labranza Mínima	-0.3	0.54
Labranza Convencional	0.63	0.79

MBE 1 error de sesgo medio. RMSE: raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.

3.3.2. Acumulación de Biomasa

En la Figura 3 se puede observar como la acumulación de biomasa en los tratamientos de labranza cero y mínima fue menor que labranza convencional en un principio, sin embargo, el tratamiento de labranza convencional tiende a disminuir su producción de biomasa hacia el final del ciclo de cultivo hasta en un 50%.

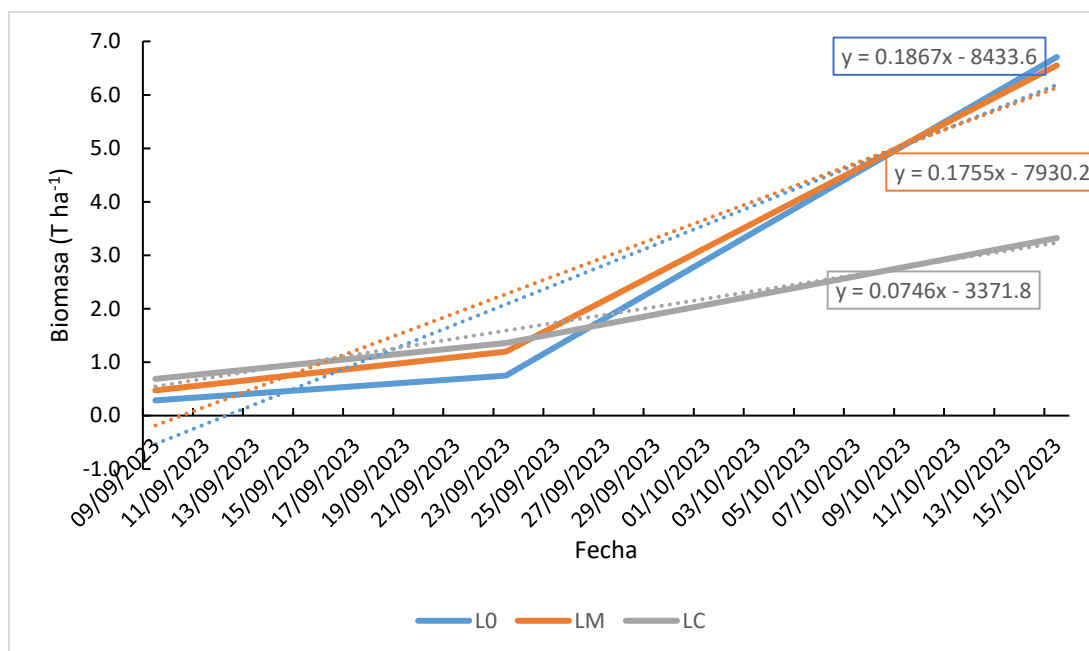


Figura 3. Biomasa acumulada en el cultivo de maíz en condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Mapimí, Durango, México. Labranza cero (L0), labranza mínima (Lm) y labranza convencional (Lc).

La acumulación de biomasa en los tratamientos de labranza cero y mínima fue por debajo de labranza convencional, sin embargo, hacia final del ciclo del cultivo la acumulación de biomasa en labranza convencional fue menor. Esto puede suceder por que el cultivo al llevar un manejo diferente a los demás, en el que se incluye una mayor remoción del suelo, contribuye a una rápida infiltración del agua, mayor humedad inicial en el suelo y desarrollarse más rápido que en los otros tratamientos. Sin embargo, labranza convencional con el tiempo tiende a disminuir el contenido de agua en el suelo debido a que se modifica la estructura de la capa superficial del suelo y el espacio poroso (Olguín *et al.*, 2017).

En cambio, en el tratamiento de labranza cero y labranza mínima al ser nulo y mínimo el disturbio en el suelo, se tiene una mayor capacidad de retención de humedad. Olivet y Cobas (2014) consideran que cuanto menor se fragmenta el suelo durante la labranza, el suelo tiende a tener una mayor capacidad para

conservar la humedad. Por lo que los tratamientos de labranza cero y mínima al recibir precipitación entre los días 15 y 16 de septiembre y primeros días del mes de octubre lograron recuperarse más rápido por su capacidad de retención de humedad.

En labranza convencional se tuvo una mayor capacidad de infiltración al romper la capa superficial del suelo, pero la retención de humedad fue mínima en virtud de que la demanda evapotranspirativa del cultivo fue mayor en este tipo de manejo, debido a que tenía un mayor incremento de producción de biomasa inicial y por ende sus requerimientos hídricos eran mayores.

3.3.3. Rendimiento

En la Figura 4 se puede observar los rendimientos observados y calculados por el modelo, donde labranza cero es el que obtuvo mayor similitud entre el rendimiento observado (0.71 t ha^{-1}) y calculado (0.85 t ha^{-1}), labranza mínima tiene un valor observado de (1.38 t ha^{-1}) y un valor calculado de (0.86 t ha^{-1}), mientras que labranza convencional tiene un valor observado de (1.23 t ha^{-1}) y un valor calculado (0.89 t ha^{-1}).

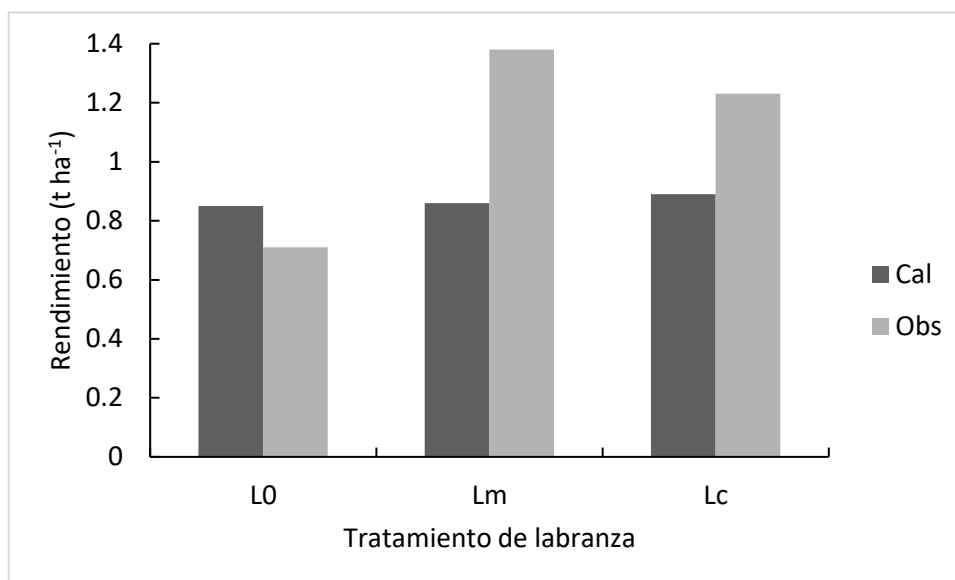


Figura 4. Rendimiento observado y calculado con el modelo ALMANACMEX en el cultivo de maíz en tres tratamientos de labranza: labranza cero (L0), labranza mínima (Lm) y labranza convencional (Lc). Cal (calculado) y Obs (observado).

El manejo de labranza mínima registró el mayor rendimiento observado (1.38 t ha-1), lo cual coincide con los resultados reportados por la Secretaría de Desarrollo Rural (SADER, 2024) en una colaboración entre el CIMMYT y el CBTA 305. En dicha investigación se demostró que el maíz criollo presenta un mejor desempeño en condiciones de temporal, debido a su adaptación al clima y a las características del suelo en las zonas agrícolas.

El rendimiento en labranza mínima coincide con los resultados obtenidos en el índice de cosecha (HI), el cual fue el más alto en este tratamiento, indicando que una mayor proporción de la biomasa total de las plantas se convirtió en rendimiento de grano de maíz (Cuadro 2).

Cuadro 2. Índice de cosecha en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.

Tratamiento	HI
Labranza Cero	0.27
Labranza Mínima	0.34
Labranza Convencional	0.32
HI: Índice de cosecha	

En el Cuadro 3 se puede observar que en labranza cero el error de sesgo medio indica una ligera subestimación del modelo, mientras que la raíz cuadrada del cuadrado medio del error indica que el modelo es muy bueno para predecir. En labranza mínima el error de sesgo medio indica una subestimación del modelo y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error indica una buena precisión del modelo. En labranza convencional el error de sesgo medio indica una subestimación del modelo, mientras que la raíz cuadrada del cuadrado medio del error indica una muy buena precisión del modelo.

Cuadro 3. Parámetros estimados para el ajuste entre valores observados y calculados de rendimiento (t ha⁻¹) en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.

Tratamiento	MBE	RMSE
Labranza Cero	-0.21	0.46
Labranza Mínima	-1.02	1.0
Labranza Convencional	-0.5	0.70

MBE: error de sesgo medio. RMSE: raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

Flores *et al.* (2013) realizaron una simulación del rendimiento del cultivo de maíz bajo condiciones de riego deficitario en el norte de Sinaloa utilizando el modelo AquaCrop. Los resultados mostraron una buena precisión en las predicciones del rendimiento de grano, con un valor de 0.79 t ha⁻¹ para la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), un valor muy similar al que se obtuvo con el modelo ALMANACMEX en el rendimiento de maíz con tratamiento de labranza convencional, esto en condiciones de temporal deficiente, lo cual indica que el modelo se puede emplear en estas regiones con condiciones climáticas similares, donde el recurso hídrico es limitado.

3.3.4. Índice de área foliar

Con relación al índice de área foliar, se determinó el error de sesgo medio y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error. En los tres tipos de labranza que son cero, mínima y convencional ocurrió una sobrestimación del modelo, mientras que la raíz cuadrada del cuadrado medio del error indicó que el modelo es bueno para predecir en labranza cero y satisfactorio en labranza mínima y convencional (Cuadro 4).

Cuadro 4. Parámetros estimados para el ajuste entre valores observados y calculados de índice de área foliar (LAI) en el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente con uso de escorrentía en el Ejido La Purísima, Durango, México. 2023.

Tratamiento	MBE	RMSE
Labranza Cero	0.64	0.8
Labranza Mínima	1.35	1.16
Labranza Convencional	1.04	1.02

MBE: error de sesgo medio. RMSE: raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

Aunque el modelo tiende a sobrestimar el índice de área foliar en los tres tipos de labranza, la precisión del modelo es buena y satisfactoria considerando que el modelo fue concebido para su uso en condiciones de riego principalmente. También, en cuanto a la biomasa y el rendimiento, la precisión del modelo suele ser muy buena.

3.3.5. Condiciones climáticas

Cabe mencionar que el año 2023 fue un año climáticamente extremoso, donde el desplazamiento de la precipitación hacia los meses finales del año se ha atribuido a efectos del cambio climático. Según informes con el inicio de la temporada de lluvias en 2023, se observó un retraso muy significativo en la temporada de lluvias en el norte y noroeste del país, principalmente en los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y específicamente al norte de Coahuila, norte de Nuevo León y sur de Tamaulipas, en los cuales la temporada de lluvias comienza de septiembre a octubre. En el año 2023 la temporada de lluvias duró menos de lo normal, entre 30 y 90 días menos de lo habitual (Servicio Meteorológico Nacional, 2024).

El 2023 está marcado por la falta de lluvias y un año extremadamente caluroso, estableciendo un récord como el año más seco y caluroso desde que se iniciaron los registros en 1941, esto también iguala el récord de temperatura más alta jamás registrada en el mundo durante los últimos 80 años (Miranda, 2024).

Esto demuestra que aún con las condiciones climáticas extremas como lo fue el año 2023, año en el que se estableció el experimento, el modelo logró simular de manera satisfactoria el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal deficiente, dando una similitud entre los datos observados y calculados en biomasa y una buena precisión del modelo en el rendimiento.

3.4. Conclusión

El modelo de simulación ALMANACMEX es una herramienta útil proyectar la producción de biomasa y el rendimiento del cultivo de maíz en diferentes tipos de labranza; sin embargo, al usar el modelo de simulación, es recomendable que éste se calibre con datos observados para garantizar que las proyecciones de rendimiento sean confiables.

Con el modelo calibrado, es posible generar escenarios de manejo para proyectar el comportamiento del cultivo, en términos de producción de biomasa en el sitio de interés. Es pertinente mencionar que el modelo ha sido calibrado bajo ciertas condiciones de aridez por lo que el uso de éste deberá de ser en sitios con condiciones similares. Acorde a los resultados, el modelo puede simular el rendimiento del cultivo al variar el manejo y condición de aridez.

3.5. Agradecimientos

Se agradece al posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo-URUZA por la formación y el apoyo proporcionados. Se hace especial mención al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca de maestría (CVU 1277419) otorgada.

3.6. Literatura citada

Aguilera C., M. y Martínez E., R. (1996). *Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera*. 4ta Edición. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 256 p.

- Azcón B., J. y Talón, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2da Edición. McGraw-Hill, México. 651 p.
- Báez González, A. D., Kiniry, J. R., & Williams, J. (2016). *ALMANACMEX. Alternativas de Manejo de Tierras Agrícolas con Modelo de Criterios de Evaluación Numérica (ALMANAC) con Interfaz Mexicana*. In Versión 1.0.18 Manual de usuario. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (43) 66 p. [https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/30980500/ManualdeUsuarioAlmanacMex\(Español\)August2017.pdf](https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/30980500/ManualdeUsuarioAlmanacMex(Español)August2017.pdf)
- Báez G., A. D., Fajardo D., R., García R., G., Osuna C., E., Kiniry, J. R., y Meki, M. N. (2020). High Sowing Densities in Rainfed Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in Mexican Semi-Arid Highlands under Future Climate Change. *Agronomy*, 10(3), 442. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10030442>
- Candelaria M., B., Ruiz R., O., Gallardo L., F., Pérez H., P., Martínez B., A., y Vargas V., L. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(3), 999-1010.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (15 Abril 2023). *Portal de geoinformación; Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/climas/clima1mgw
- Flores L., H. E.; Ruíz C., J. A.; Mora O., C.; De la, Zarazúa V., P., Chávez Durán, Á. A.; Ramírez Vega, H. y Velásquez V., M. A. (2014). Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano en maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(SPE10), 2007–2020.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., & Mejía-Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*, 47(4), 347-359.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). *Agricultura de conservación*. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/es/>
- Kiniry, J. R. (2019). *Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment Criteria (ALMANAC) Simulation Model*. NAL USDA. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US2019X00169>

- López S., T., Herrera P., J., González R., F., Cid L., G., & Chaterlán D., Y. (2009). Eficiencia de un modelo de simulación de cultivo para la predicción del rendimiento del maíz en la región del sur de la Habana. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18 (3), 1-6.
- Miranda F. (9 enero 2024). En México, 2023 fue el año más seco desde que se tiene registro, dice Meteorológico Nacional. *Telediario*. <https://www.telediario.mx/nacional/mexico-tuvo-en-2023-el-ano-mas-seco-desde-que-hay-registros>
- Olguín L., J. L., Guevara G., R. D., Carranza M., J. A., Scopel, E., Barreto G., O. A., Mancilla V., O. R., y Talavera V., A. (2017). Producción y rendimiento de maíz en cuatro tipos de labranza bajo condiciones de temporal. *Idesia (Arica)*, 35(1), 51-61. Epub 00 de de 2017. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292017005000018>
- Olivet R., Y. E. y Cobas H., D. (2017). Efecto de dos sistemas de labranza mínima sobre la porosidad de un *Fluvisol* para cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *REDEL. Revista Granmense de Desarrollo Local*, 1 (1): 13-21.
- Pérez, M. O., Delfín, C., Fregoso, A. y Cotler, H. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 78: 65-84.
- Reicosky, C. y Saxton, K. E. (2009). *Reducción de las emisiones ambientales y secuestro de Carbono*. En Baker, C. J. y Saxton, K. E. (Eds). *Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación* (311-324 pp). FAO.
- Sanz, I. (2023). *Gestionando la salud del suelo con la labranza de conservación*. <https://blog.eagronom.com/es/gestionando-la-salud-del-suelo-con-la-labranza-de-conservaci%C3%B3n>
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (30 marzo 2024). *Se incrementa producción de maíz con alternativas de labranza en la Mixteca Poblana*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-incrementa-produccion-de-maiz-con-alternativas-de-labranza-en-la-mixteca-poblana>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. Edición 2015. México. 470 p.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2024). *Reporte anual del clima en México 2023*. Comisión Nacional del Agua. Año 13, N° 13. 98 p.

Soto, O.; Galv3ez, G. y Sigarroa, A. (2004). *Estudio y modelaci3n de algunas variables que influyen en el rendimiento agr3cola de la caña de azúcar*. Evento ATAC.

Williams, J.R. (1990). *EPIC- Erosion Productivity Impact Calculator*. Model Documentation. Vol. 2. User Manual. Submitted as USDA-ARS. Technical Bulletin. 236 p.

3.7. Ap3ndice

Ap3ndice 1. Datos climáticos en el Municipio de Mapim3, Durango, M3xico, 2023.

Año	Mes	Día	Tmax	Tmin	PP
2023	1	1	26	2	0
2023	1	2	26	5	0
2023	1	3	25	5	0
2023	1	4	22	3	0
2023	1	5	23	0	0
2023	1	6	27	0	0
2023	1	7	26	4	0
2023	1	8	22	5	0
2023	1	9	23	9	0
2023	1	10	26	3	0
2023	1	11	26	0	0
2023	1	12	24	4	0
2023	1	13	19	0	0
2023	1	14	24	1	0
2023	1	15	28	1	0
2023	1	16	26	6	0
2023	1	17	26	3	0
2023	1	18	25	4	0
2023	1	19	20	3	0
2023	1	20	24	6	0
2023	1	21	25	2	0
2023	1	22	19	0	0
2023	1	23	25	-1	0
2023	1	24	20	4	0
2023	1	25	18	-3	0
2023	1	26	17	1	0
2023	1	27	12	2	0
2023	1	28	22	6	0
2023	1	29	28	5	0

2023	1	30	29	7	0
2023	1	31	29	12	0
2023	2	1	21	7	0
2023	2	2	21	5	0
2023	2	3	19	1	0
2023	2	4	23	0	0
2023	2	5	26	2	0
2023	2	6	30	1	0
2023	2	7	27	8	0
2023	2	8	20	8	0
2023	2	9	23	-3	0
2023	2	10	16	4	0
2023	2	11	16	-5	0
2023	2	12	20	5	0
2023	2	13	30	8	0
2023	2	14	26	6	0
2023	2	15	30	5	0
2023	2	16	20	8	0
2023	2	17	15	2	0
2023	2	18	16	2	0
2023	2	19	27	0	0
2023	2	20	29	6	0
2023	2	21	32	8	0
2023	2	22	31	15	0
2023	2	23	27	9	0
2023	2	24	31	7	0
2023	2	25	30	15	0
2023	2	26	32	10	0
2023	2	27	32	12	0
2023	2	28	35	10	0
2023	3	1	33	16	0
2023	3	2	32	13	0
2023	3	3	23	2	0
2023	3	4	28	2	0
2023	3	5	30	3	0
2023	3	6	32	3	0
2023	3	7	32	6	0
2023	3	8	33	7	0
2023	3	9	32	14	0
2023	3	10	32	16	0
2023	3	11	33	14	0
2023	3	12	32	9	0
2023	3	13	30	10	0
2023	3	14	22	12	0
2023	3	15	32	13	0

2023	3	16	32	10	0
2023	3	17	28	16	0
2023	3	18	19	9	0
2023	3	19	14	5	0
2023	3	20	26	0	0
2023	3	21	31	5	0
2023	3	22	34	8	0
2023	3	23	36	9	0
2023	3	24	33	12	0
2023	3	25	32	7	0
2023	3	26	33	6	0
2023	3	27	32	10	0
2023	3	28	30	12	0
2023	3	29	29	9	0
2023	3	30	32	15	0
2023	3	31	34	16	0
2023	4	1	32	13	0
2023	4	2	33	17	0
2023	4	3	35	12	0
2023	4	4	31	18	0
2023	4	5	31	15	0
2023	4	6	29	13	0
2023	4	7	28	9	0
2023	4	8	29	13	0
2023	4	9	32	13	0
2023	4	10	31	16	0
2023	4	11	29	17	0
2023	4	12	30	15	0
2023	4	13	32	15	0
2023	4	14	28	16	0
2023	4	15	29	12	0
2023	4	16	32	12	0
2023	4	17	33	13	0
2023	4	18	33	12	0
2023	4	19	35	10	0
2023	4	20	34	18	0
2023	4	21	33	10	0
2023	4	22	35	14	0
2023	4	23	35	15	0
2023	4	24	32	13	0
2023	4	25	32	10	0
2023	4	26	31	14	0
2023	4	27	32	11	0
2023	4	28	34	14	0
2023	4	29	28	14	0

2023	4	30	32	4	0
2023	5	1	36	8	0
2023	5	2	34	22	0
2023	5	3	34	18	0
2023	5	4	34	21	0
2023	5	5	35	19	0
2023	5	6	35	23	0
2023	5	7	36	20	0
2023	5	8	36	17	0
2023	5	9	35	16	0
2023	5	10	35	15	0
2023	5	11	34	12	0
2023	5	12	35	18	0
2023	5	13	33	16	0
2023	5	14	29	15	0
2023	5	15	29	16	0
2023	5	16	30	14	0
2023	5	17	32	17	0
2023	5	18	33	19	0
2023	5	19	34	14	0
2023	5	20	27	14	13
2023	5	21	38	23	0
2023	5	22	37	15	0
2023	5	23	35	16	0
2023	5	24	39	14	0
2023	5	25	40	17	0
2023	5	26	41	19	0
2023	5	27	40	16	0
2023	5	28	38	18	0
2023	5	29	38	15	0
2023	5	30	39	14	0
2023	5	31	41	19	0
2023	6	2	42	25	0
2023	6	3	40	22	0
2023	6	4	38	14	0
2023	6	5	39	18	0
2023	6	6	38	20	0
2023	6	7	42	15	0
2023	6	8	42	17	0
2023	6	9	42	15	0
2023	6	10	43	18	0
2023	6	11	45	18	0
2023	6	12	45	19	0
2023	6	13	46	19	0
2023	6	14	44	22	0

2023	6	15	45	19	0
2023	6	16	45	20	0
2023	6	17	42	18	0
2023	6	18	44	18	0
2023	6	19	45	19	0
2023	6	20	47	18	0
2023	6	21	46	20	0
2023	6	22	46	26	0
2023	6	23	43	20	0
2023	6	24	44	23	0
2023	6	25	44	18	0
2023	6	26	40	18	0
2023	6	27	40	19	0
2023	6	28	41	19	0
2023	6	29	42	19	0
2023	6	30	39	19	0
2023	7	1	35	19	0
2023	7	2	31	18	0
2023	7	3	30	19	0
2023	7	4	35	19	0
2023	7	5	37	19	0
2023	7	6	39	20	0
2023	7	7	40	18	0
2023	7	8	39	21	0
2023	7	9	40	20	0
2023	7	10	42	22	0
2023	7	11	43	21	0
2023	7	12	44	19	0
2023	7	13	40	21	0
2023	7	14	43	22	0
2023	7	15	43	19	0
2023	7	16	40	20	0
2023	7	17	41	15	0
2023	7	18	41	19	0
2023	7	19	43	17	0
2023	7	20	42	19	0
2023	7	21	42	19	0
2023	7	22	42	18	0
2023	7	23	41	19	0
2023	7	24	42	17	0
2023	7	25	39	17	0
2023	7	26	40	20	3.55
2023	7	27	41	19	0
2023	7	28	40	19	0
2023	7	29	40	16	0

2023	7	30	38	20	0
2023	7	31	40	17	0
2023	8	1	42	19	0
2023	8	2	41	19	0
2023	8	3	42	18	0
2023	8	4	41	22	0
2023	8	5	41	20	0
2023	8	6	44	17	0
2023	8	7	44	18	0
2023	8	8	44	18	0
2023	8	9	45	18	0
2023	8	10	44	23	0
2023	8	11	42	25	0
2023	8	12	41	19	2.03
2023	8	13	41	18	1.52
2023	8	14	40	17	0
2023	8	15	41	22	0
2023	8	16	39	17	0
2023	8	17	41	15	0
2023	8	18	40	20	0
2023	8	19	39	20	0
2023	8	20	39	18	0
2023	8	21	38	16	0
2023	8	22	34	18	0
2023	8	23	39	14	0.25
2023	8	24	39	20	0
2023	8	25	41	17	0
2023	8	26	41	17	0
2023	8	27	40	16	0
2023	8	28	39	14	0
2023	8	29	41	15	0
2023	8	30	39	19	0.76
2023	8	31	40	17	0
2023	9	1	41	19	0
2023	9	2	40	16	0
2023	9	3	40	15	0
2023	9	4	42	14	0
2023	9	5	43	15	0
2023	9	6	41	16	0
2023	9	7	41	20	0
2023	9	8	41	17	0
2023	9	9	40	17	0.25
2023	9	10	40	15	0
2023	9	11	41	17	0
2023	9	12	40	14	0

2023	9	13	40	16	0
2023	9	14	40	21	0
2023	9	15	37	18	7.36
2023	9	16	39	18	17.27
2023	9	17	35	17	0
2023	9	18	37	16	0
2023	9	19	40	14	0
2023	9	20	40	15	0
2023	9	21	40	16	0
2023	9	22	41	13	0
2023	9	23	43	13	0.25
2023	9	24	44	15	0
2023	9	25	41	16	0
2023	9	26	39	18	0
2023	9	27	39	17	0
2023	9	28	41	13	0
2023	9	29	39	12	0
2023	9	30	38	12	0
2023	10	1	38	17	0
2023	10	2	37	21	0
2023	10	3	40	16	0
2023	10	4	37	19	0
2023	10	5	34	19	2.28
2023	10	6	22	15	3.55
2023	10	7	16	11	7.62
2023	10	8	15	11	11.93
2023	10	9	18	14	9.39
2023	10	10	18	15	6.35
2023	10	11	31	15	0
2023	10	12	33	12	0
2023	10	13	37	15	0
2023	10	14	31	16	0
2023	10	15	21	14	0.25
2023	10	16	28	13	0
2023	10	17	34	12	0
2023	10	18	31	15	0
2023	10	19	30	13	0
2023	10	20	31	14	0
2023	10	21	32	16	0
2023	10	22	34	12	0
2023	10	23	28	13	0
2023	10	24	34	12	0
2023	10	25	34	10	0
2023	10	26	36	9	0
2023	10	27	35	12	0

2023	10	28	34	19	0
2023	10	29	37	16	0
2023	10	30	24	8	0
2023	10	31	12	6	0
2023	11	1	18	2	0
2023	11	2	26	1	0
2023	11	3	29	8	0
2023	11	4	29	6	0
2023	11	5	31	6	0
2023	11	6	25	10	0
2023	11	7	33	7	0
2023	11	8	36	11	0
2023	11	9	24	11	0
2023	11	10	27	9	0
2023	11	11	26	14	1.01
2023	11	12	17	13	42.74
2023	11	13	19	11	0
2023	11	14	23	11	1.01
2023	11	15	18	8	0
2023	11	16	27	6	0
2023	11	17	33	9	0
2023	11	18	30	10	0
2023	11	19	34	9	0
2023	11	20	32	5	0
2023	11	21	18	8	0
2023	11	22	16	4	5.58
2023	11	23	19	0	0
2023	11	24	25	3	0
2023	11	25	26	3	0
2023	11	26	29	5	0
2023	11	27	19	5	0
2023	11	28	22	2	0
2023	11	29	26	2	0
2023	11	30	29	5	0
2023	12	1	27	5	0
2023	12	2	24	6	0
2023	12	3	27	4	0
2023	12	4	26	0	0
2023	12	5	27	1	0
2023	12	6	24	4	0
2023	12	7	29	7	0
2023	12	8	31	6	0
2023	12	9	29	5	0
2023	12	10	21	0	0
2023	12	11	24	-1	0

2023	12	12	26	4	0
2023	12	13	22	8	0
2023	12	14	26	6	0
2023	12	15	25	5	0
2023	12	16	25	4	0
2023	12	17	26	1	0
2023	12	18	26	2	0
2023	12	19	23	5	0
2023	12	20	26	3	0
2023	12	21	27	5	0
2023	12	22	23	9	0
2023	12	23	29	11	0
2023	12	24	27	4	0
2023	12	25	19	3	0
2023	12	26	23	0	0
2023	12	27	23	0	0
2023	12	28	24	0	0
2023	12	29	22	-1	0
2023	12	30	22	-4	0
2023	12	31	27	-1	0

Temperatura maxima (Tmax), temperatura minima (Tmin), precipitacion en mm (PP).