



## EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL INGENIO TRES VALLES, VERACRUZ, MÉXICO

### EFFECT OF CLIMATE CHANGES ON SUGARCANE YIELD AT THE TRES VALLES, VERACRUZ, MEXICO SUGAR-MILL

Fermín Sandoval-Romero<sup>1</sup>, Miguel Á. Martínez-Damián<sup>2\*</sup>, Ramón Valdivia-Alcalá<sup>1</sup> y J. Reyes Altamirano-Cárdenas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, México. <sup>2</sup>Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (angel01@colpos.mx)

#### RESUMEN

En México la agroindustria de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) se ha visto impactada por alteraciones provocadas por el cambio climático, y consecuentemente, esto repercute en la producción de azúcar y en la seguridad alimentaria. El objetivo del presente estudio fue investigar el impacto de la alteración de la temperatura máxima, la precipitación y la radiación solar sobre el rendimiento de las tres principales variedades de caña de azúcar en el área de abastecimiento del ingenio Tres Valles, Veracruz, México. El método utilizado fue la simulación del crecimiento de la caña de azúcar con el software Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT) utilizando datos de clima, suelo, coeficientes genéticos y de manejo del cultivo. Los resultados muestran que para el periodo de simulación 1984-2023, y bajo un escenario de un incremento de la temperatura máxima de 2 °C, el rendimiento de las variedades CP 72-2086, MEX 69-290 e ITV 92-373 decrece en 10 %. Si la precipitación aumenta 100 mm el rendimiento se incrementa en 5 % el rendimiento, y éste disminuye en 8 % si la radiación solar se reduce 10 %. Se concluye que la alteración de los patrones de temperatura, precipitación y radiación solar impacta en el manejo del cultivo, su rendimiento y productividad.

**Palabras clave:** *Saccharum officinarum* L., coeficientes genéticos, modelos de crecimiento de cultivos, seguridad alimentaria, variedades de caña de azúcar.

#### SUMMARY

In Mexico, the sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) agro-industry has been impacted by alterations caused by climate change, and consequently, this affects sugar production and food security. The objective of this study was to investigate the impact of altered maximum temperature, precipitation, and solar radiation on the yield of the three main sugarcane varieties in the supply area of the Tres Valles sugar-mill, Veracruz, Mexico. The method used was the simulation of sugarcane growth with the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) software, using data on climate, soil, genetic coefficients and crop management. Results show that for the simulation period 1984-2023, and under a scenario of a maximum temperature increase of 2 °C, yield of varieties CP 72-2086, MEX 69-290 and ITV 92-373 decreases by 10 %. If precipitation increases by 100 mm yield is increased by 5 %, and it decreases by 8 % if solar radiation is reduced by 10 %. It is concluded that the alteration of temperature, precipitation and solar radiation patterns impacts crop management, yield and productivity.

**Index words:** *Saccharum officinarum* L., crop growth models, food security, genetic coefficients, sugarcane varieties.

#### INTRODUCCIÓN

Aun cuando no existe un consenso entre la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) acerca de qué es el cambio climático, para fines empíricos éste se define como un fenómeno global que ocasiona cambios a largo plazo en los patrones climáticos del planeta, incluyendo temperatura, precipitación y eventos climáticos extremos (Pielke, 2004). La causa sustantiva del cambio climático es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), debido a actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura intensiva (Trenberth, 2018; Zhong, 2016). Los efectos de un fenómeno global, como el cambio climático, son locales.

Entre la multitud de efectos del cambio climático, dos revisten interés por su impacto en la agricultura, a saber: los cambios en los patrones de precipitación y los incrementos en la temperatura; debido a esto, algunas regiones experimentan sequías más frecuentes e intensas y otras se inundan, lo que a su vez incrementa los riesgos para la agricultura y la seguridad alimentaria, pues la producción de biomasa, y en particular los rendimientos de los cultivos de importancia económica, son afectados por las condiciones climáticas cambiantes (Liu *et al.*, 2025).

En México, la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es la materia prima fundamental para la elaboración del azúcar de caña. Este edulcorante es básico en la ingesta de la población mexicana, con un consumo *per cápita* de

37.5 kg de azúcar que le aportan calorías y energía (INEGI, 2021; SE, 2012) y por su uso como insumo intermedio en la industria de repostería y galletera (INEGI, 2021). La agroindustria de la caña de azúcar es importante en México en términos económicos, y por ser una fuente de empleo; por ejemplo, en el año 2023 la caña de azúcar se posicionó en el tercer sitio en términos del valor de la producción agrícola total con \$52.9 mil millones de pesos mexicanos (MXN), (5.8 %) tan solo por debajo del maíz grano cuyo valor de la producción fue de \$172.4 mil millones MXN (19.0 %) y del aguacate con \$60.1 mil millones MXN (6.6 %) (SIAP, 2024). De acuerdo con la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA), en la industria azucarera se generan 448.9 mil empleos directos, entre trabajadores de reparación de los ingenios (1.3 %), productores abastecedores de caña de azúcar (36.0 %), jornaleros (32.1 %), cortadores (14.7 %), transportistas (6.9 %) y jubilados (2.4 %), mientras que se generan 2.2 millones de empleos indirectos (CNIAA 2024; INEGI, 2021; Martínez-Ballesteros *et al.*, 2023).

En la investigación de caña de azúcar las parcelas demostrativas permiten transferir nuevas tecnologías y variedades a los productores, mientras que las experimentales facilitan ensayos controlados para medir con precisión su impacto en rendimiento y manejo agronómico (Kondylis *et al.*, 2017; Saldivia-Tejeda *et al.*, 2024).

Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos pueden definirse como aquellos algoritmos computacionales que utilizan ecuaciones matemáticas para representar y predecir el desarrollo y rendimiento de las plantas bajo diversas condiciones ambientales, prácticas culturales y prácticas de manejo en los que se integran factores múltiples como el clima, suelo, características genéticas, fisiológicas, entre otras, para simular el comportamiento de los cultivos en el largo plazo (Cervantes-Preciado *et al.*, 2019; Hoogenboom *et al.*, 2019; Kosamkar y Kulkarni, 2019).

En la actualidad existe una multitud de modelos que se utilizan para simular el crecimiento de los principales cultivos de interés económico y de seguridad alimentaria. Anawar y Strezov (2019) identificaron más de 20 modelos para simular los rendimientos de diferentes cultivos, agrupándolos en cuatro categorías que son los modelos basados en la radiación solar; por ejemplo, el APSIM (Holzworth *et al.*, 2014) y el SWAT (Arnold *et al.*, 1998), el modelo Aquacrop de la FAO (Steduto *et al.*, 2009) que simula la respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua y es útil para las condiciones en las que este recurso es un factor limitante en la producción de cultivos, los modelos integrados con énfasis en la fotosíntesis, por

ejemplo el DSSAT (Jones *et al.*, 2003) y el Canegro (Singels *et al.*, 2010), y los modelos integrados con énfasis en la bioquímica, entre los cuales se encuentran el Agro-IB IS (Kucharik, 2003) y el GRASS (Matthews *et al.*, 2013).

Uno de los modelos más utilizados en diversos países es el llamado Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT, por sus siglas en inglés). El DSSAT ha sido utilizado ampliamente en investigación agrícola y en la toma de decisiones para el manejo de cultivos. Algunas aplicaciones del software DSSAT son: simulación de crecimiento y rendimiento de cultivos, evaluación de estrategias de manejo agrícola, análisis del impacto del clima, apoyo a políticas agrícolas y estudios de seguridad alimentaria (Bhengra *et al.*, 2016; Gilbert *et al.*, 2008; Maat, 2011; Marin *et al.*, 2011). Ahora bien, en el marco de los modelos de crecimiento de cultivos, un cultivar se define como una variedad específica de una planta que ha sido seleccionada y mejorada por sus características particulares como rendimiento, resistencia a enfermedades, tolerancia a condiciones ambientales adversas, entre otras.

Dada la importancia de la agroindustria de la caña de azúcar en el ámbito económico, generación de empleos y como insumo para la producción de azúcar estándar que garantice la suficiencia alimentaria de este edulcorante en un entorno ambiental de cambio climático, el presente estudio tuvo por objetivo investigar mediante simulaciones del crecimiento de la caña de azúcar, con el uso de las variables climáticas en las tres principales variedades de caña de azúcar en el área de abastecimiento del ingenio Tres Valles en el estado de Veracruz, México para determinar el impacto del cambio climático sobre el rendimiento del cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio se ubica en la porción sur de la llanura costera del Golfo de México, dentro de la subprovincia Veracruzana, caracterizada por una llanura aluvial con lomeríos suaves de altitud variable con suelos predominantemente vertisol (66 %), phaeozem (28 %) y luvisol (3 %), que son aptos para agricultura intensiva. El clima corresponde a los tipos cálido subhúmedo (Aw1) y cálido húmedo (Am), con lluvias concentradas en verano, principalmente de junio a septiembre, y una variación mensual de precipitación que oscila entre 21 mm en los meses más secos y más de 420 mm en los más lluviosos. La hidrografía pertenece a la cuenca del Papaloapan, con ríos perennes como el Tonto, Blanco, Amapa y Mondongo. La vegetación natural incluye pastizales cultivados y tulares,

con predominio de gramíneas forrajeras como pangola (*Digitaria* sp.), estrella de África (*Cynodon plectostachyus*) y kikuyo (*Cenchrus clandestinus*). Las características agroecológicas del área de estudio favorecen el cultivo de caña de azúcar bajo régimen de temporal, con alta conectividad vial y eficiencia logística hacia el ingenio Tres Valles. El centro del área de estudio se localiza en las coordenadas 18° 14' 12" latitud norte y 96° 08' 13" longitud oeste, que corresponden al emplazamiento del ingenio Tres Valles. En la Figura 1 se muestra la localización geográfica del ingenio Tres Valles el cual se encuentra enclavado en el centro de los municipios de Tres Valles, Otatitlán, Cosamaloapan y Tierra Blanca, Veracruz, México (Gobierno del Estado de Veracruz, 2023).

### Recopilación de información

Una vez que se identificaron las tres principales variedades de caña de azúcar del ingenio Tres Valles se procedió a recopilar y obtener los datos disponibles de las variables para generar el archivo del clima utilizado por DSSAT (Cuadro 1). Es importante mencionar que la mayoría de los datos no estaban disponibles al momento de la presente investigación; no obstante, dado que la caña de azúcar es uno de los cultivos más estudiados se procedió a la búsqueda de dicha información con base en la revisión de fuentes bibliográficas, por lo que ésta puede considerarse como datos genéricos de acuerdo con Jones *et al.* (2003), que en la medida de lo posible fueron corroborados en entrevistas semiestructuradas con tres técnicos que han laborado en el ámbito de la producción

de caña de azúcar durante años en el área de estudio.

Los valores de temperatura mínima, máxima y media; precipitación y radiación solar corresponden a valores diarios para un periodo de 39 años que comprende del 01 de enero de 1984 al 31 de diciembre de 2023 (NASA, 2024).

Los valores de las variables del suelo que se utilizaron para calibrar los parámetros de simulación del crecimiento de la caña de azúcar son los que utiliza internamente el DSSAT/Canegro (Cuadro 2). Los datos corresponden a un perfil del suelo de cinco niveles de profundidad realizado en el ejido Santa Lucia municipio de Tierra Blanca, Veracruz en el paraje con las coordenadas 18° 25' 06" latitud norte y 96° 10' 37" longitud oeste.

Para calibrar los parámetros genéticos en DSSAT/Canegro para las tres variedades de caña de azúcar más importantes en el ingenio Tres Valles se procedió a determinar los coeficientes genéticos hipotéticos que influyen en su crecimiento y desarrollo (Cuadro 3). Estos coeficientes se obtuvieron de la revisión de Gilbert *et al.* (2008), Verma *et al.* (2023), Jones y Singels (2008), Marin *et al.* (2011) y de los coeficientes técnicos incorporados por default en el archivo SUGAR.CUL del DSSAT/Canegro v4.8.

### Definición de los parámetros genéticos

La definición de los parámetros genéticos del Cuadro 3 se realiza a continuación. El parámetro MaxPARCE se

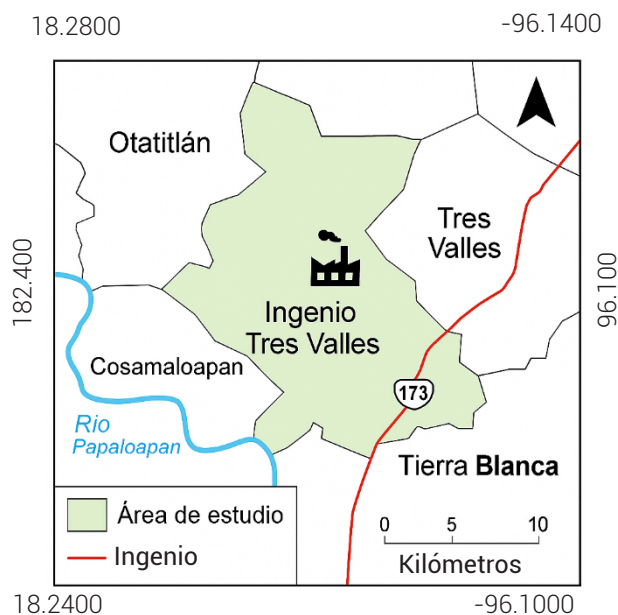


Figura 1. Ubicación geográfica del ingenio Tres Valles, Veracruz, México.

refiere a la eficiencia máxima de conversión de radiación, APFMX se refiere a la fracción máxima de incrementos de masa seca asignados a masa seca aérea, STKPFMAX se define como la fracción de incrementos diarios de masa seca aérea particionados al tallo a altas temperaturas en un cultivo maduro, LFMAX es el número máximo de hojas verdes en una planta saludable y bien regada, mientras que MXLFAREA define al área foliar máxima asignada a todas las hojas por encima del número MXLFARNO.

El parámetro genético MXLFARNO se refiere al número de hoja por encima del cual el área foliar se limita a MXLFAREA, PI1 se define como el intervalo de filocrono 1 (para números de hoja por debajo de Pswitch, PI2 es el intervalo de filocrono 2 [para números de hoja por encima de número de hoja en el que cambia el filocrono (PSWITH)]).

El coeficiente genético TTPLNTEM se refiere al tiempo térmico hasta la emergencia para un cultivo de plantilla, mientras que TTRATNEM define tiempo térmico hasta la emergencia para un cultivo de soca, CHUPIBASE es el tiempo térmico desde la emergencia hasta el inicio del crecimiento del tallo, TT\_POPGROWTH es el tiempo térmico hasta la población máxima de tallos, y finalmente,

MAX\_POP se define como la población máxima de tallos.

Los parámetros genéticos anteriores de las tres variedades fueron introducidos al módulo del DSSAT/Canegro llamado Calculadora de Coeficientes Genéticos (GENCAL por su abreviatura en inglés) para ser calibrados y ser utilizados posteriormente como base de la simulaciones realizadas dentro del DSSAT/Canegro sobre el crecimiento de la caña de azúcar. Antes de realizar las simulaciones los coeficientes resultantes se ajustaron para que reflejaran los datos observados de los rendimientos físicos de la caña de azúcar del ingenio Tres Valles en las simulaciones realizadas.

En DSSAT, otro concepto de información necesario de introducir para poder realizar las simulaciones es el referente al manejo de las respectivas variedades. En el Cuadro 4 se muestran los datos más relevantes de las prácticas de manejo de las tres variedades identificadas como las más importantes para el ingenio estudiado. La información se obtuvo de las fuentes secundarias Bhengra *et al.* (2016), Cervantes *et al.* (2019), Hoogenboom *et al.* (2019), Jones y Singels (2018), Singels *et al.* (2008) y sobre todo de CNIAA (2024).

**Cuadro 1. Georeferenciación y variables climáticas relevantes del ingenio Tres Valles.**

Concepto	Valores	Unidades	Observaciones
Latitud norte	18.236667	Grados decimales	Datos del municipio de Tres Valles, Veracruz, México
Longitud oeste	-96.136944	Grados decimales	
Altitud	450.57	Metros sobre el nivel mar	
Temperatura mínima	NA <sup>†</sup>	Grados centígrados	
Temperatura máxima	NA.	Grados centígrados	
Precipitación	NA.	Milímetros	
Radiación solar	NA.	MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> <sup>††</sup>	

<sup>†</sup>NA: no aplica, <sup>††</sup>Megajoules, m: metro. Información de NASA (2024), CNIAA (2024) y entrevistas personales con técnicos cañeros.

**Cuadro 2. Variables utilizadas para la calibración de los parámetros del suelo en DSSAT/ Canegro.**

Profundidad (cm)	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Capacidad de campo (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Punto de marchitez permanente (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Capacidad hidráulica saturada (cm h <sup>-1</sup> )	pH	Materia orgánica (%)
0-15	1.30	0.35	0.15	1.20	6.5	2.5
15-30	1.35	0.33	0.14	0.80	6.7	2.0
30-60	1.40	0.30	0.13	0.50	6.8	1.5
60-90	1.45	0.28	0.12	0.30	7.0	1.0
90-120	1.50	0.25	0.10	0.20	7.2	0.8

**Cuadro 3. Coeficientes genéticos hipotéticos de las variedades de caña de azúcar del ingenio Tres Valles, Veracruz, México.**

Coeficiente genético	Variedades		
	CP 72-2086	MEX 69-290	ITV 92-373
MaxPARCE (g MJ <sup>-1</sup> )	9.9	0.87	0.89
APFMX	0.88	0.87	0.89
STKPFMAX	0.65	0.63	0.64
LFMAX	12	11	13
MXLFAREA (cm <sup>2</sup> )	360	350	370
MXLFARNO	15	14	16
PI1 (°C día)	69	70	78
PI2 (°C día)	169	170	168
PSWITCH	18	17	19
TTPLNTEM (°C día)	428	430	425
TTRATNEM (°C día)	203	205	200
CHUPIBASE (°C día)	1050	1060	1040
TT_POPGROWTH (°C día)	600	610	595
MAX_POP (tallos m <sup>-2</sup> )	30	28	31

Adaptado con información de Gilbert *et al.* (2008), Verma *et al.* (2023), Jones y Singels (2008), Marin *et al.* (2011) e información de campo de entrevistas con dos técnicos y tres productores cañeros.

Una vez que se dispuso de los datos de clima, suelo, genéticos y manejo de las tres variedades de la caña de azúcar relevantes se introdujeron en DSSAT 4.8 mediante la respectiva herramienta con que cuenta el programa para ello; por ejemplo, los datos de clima se introdujeron mediante la herramienta "Weatherman" que está integrada dentro del propio DSSAT. De esta manera se prepararon los datos de clima, suelo, coeficientes genéticos y de manejo agronómico y se procedió a configurar el archivo de simulación. Una vez que se cargaron los archivos de datos al DSSAT se procedió a ejecutar las simulaciones.

Finalmente, un concepto metodológico relevante a considerar a partir de los resultados obtenidos de los escenarios de simulación en DSSAT/Canegro, es que los mismos constituyeron una línea base. En el contexto de simulación agronómica con DSSAT/Canegro una línea base se define como el conjunto de condiciones iniciales, medibles y verificables que representan el estado de referencia del cultivo bajo condiciones actuales o históricas, sin modificaciones climáticas ni ajustes experimentales. Esta línea base permite establecer un punto de comparación técnico frente a escenarios simulados de variación climática con el fin de evaluar su impacto sobre el rendimiento potencial de la caña de azúcar (Jones *et al.*, 2003).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de las simulaciones para las tres variedades de caña relevantes para el área de abastecimiento del ingenio Tres Valles se muestran en el Cuadro 5.

Los rendimientos (promedio, máximo y mínimo) de la respectiva variedad de caña de azúcar son resultados que el propio DSSAT determinó con sus algoritmos internos utilizando los datos de clima, suelo, coeficientes genéticos y de manejo; es decir, son resultados de las simulaciones, los cuales se compararon con datos de la literatura consultada y de esta forma se realizó su validación, pues el establecimiento de una parcela experimental en el área de influencia del ingenio Tres Valles hubiese requerido un periodo largo para la toma de observaciones y visitas periódicas para las labores culturales y agronómicas, lo cual fue inviable por disponer de recursos limitados para dicho propósito. Los resultados anteriores pueden considerarse como una línea de base a partir de los cuales pueden analizarse escenarios de variación en las tres variables del clima y determinar el impacto del mismo sobre el rendimiento de las variedades de caña de azúcar. Para este propósito se plantearon tres escenarios, que fueron, respectivamente: 1) aumento de la temperatura máxima en 2 °C, 2) incremento de la precipitación anual

**Cuadro 4. Variables de manejo de las variedades para la calibración del modelo de crecimiento de la caña de azúcar.**

Parámetro de manejo	Variedades		
	CP 72-2086	MEX 69-290	ITV 92-373
Fecha de siembra	15/12/2023	15/12/2023	15/12/2023
Método de siembra	1 (tallos de caña)	1 (tallos de caña)	1 (tallos de caña)
Profundidad de siembra (cm)	20	20	20
Espacio entre surcos (cm)	140	140	140
Densidad de siembra (tallos m <sup>-2</sup> )	12	11	13
Método de riego	2 (aspersor)	2 (aspersor)	2 (aspersor)
Cantidad de riego (mm/aplicación)	50	50	50
Intervalo de riego (días)	14	14	14
Fecha de fertilización con nitrógeno (N)	15/01/2024	15/01/2024	15/01/2024
Cantidad de N aplicado (kg ha <sup>-1</sup> )	150	140	160
Fecha de fertilización con fosforo (P)	15/01/2024	15/01/2024	15/01/2024
Cantidad aplicada de fosforo (P) (kg ha <sup>-1</sup> )	60	55	65
Fecha de fertilización con potasio (K)	15/01/2024	15/01/2024	15/01/2024
Cantidad aplicada de K (kg ha <sup>-1</sup> )	100	90	110
Fecha de cosecha	15/12/2024	15/12/2024	15/12/2024
Cantidad restante de residuos (kg ha <sup>-1</sup> )	5000	4800	5200

Adaptado con información de Bhengra *et al.* (2016), Cervantes *et al.* (2019), Hoogenboom *et al.* (2019), Jones y Singels (2018), Singels *et al.* (2008), CNIAA (2024) e información de campo de entrevistas con técnicos y productores cañeros.

**Cuadro 5. Resultados de la simulación del rendimiento de la caña de azúcar en el área del ingenio Tres Valles, Veracruz. Periodo de simulación 1983-2022.**

Concepto	Resultado
Variedad: CP 72-2086	
Rendimiento promedio:	80 t ha <sup>-1</sup>
Rendimiento máximo:	95 t ha <sup>-1</sup> (año 1990)
Rendimiento mínimo:	60 t ha <sup>-1</sup> (año 2010)
Variedad: MEX 69-290	
Rendimiento promedio:	75 t ha <sup>-1</sup>
Rendimiento máximo:	90 t ha <sup>-1</sup> (año 1990)
Rendimiento mínimo:	55 t ha <sup>-1</sup> (año 2010)
Variedad: ITV 92-373	
Rendimiento promedio:	85 t ha <sup>-1</sup>
Rendimiento máximo:	100 t ha <sup>-1</sup> (año 1990)
Rendimiento mínimo:	65 t ha <sup>-1</sup> (año 2010)

en 100 mm y 3) reducción de la radiación solar en 10 %. El planteamiento de estos escenarios y el impacto de la variación en las variables de clima sobre el rendimiento se muestran en los Cuadros 6, 7 y 8. Es necesario señalar que no se utilizó el modelo oficial llamado Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas inglés) porque se trata un modelo de trayectorias globales y está más orientado al estudio del impacto de los gases de efecto invernadero (GEI), mientras que los tres escenarios planteados se diseñaron para evaluar la sensibilidad del modelo DSSAT en condiciones locales, como es la región de influencia del ingenio Tres Valles.

En el Cuadro 6, y bajo el supuesto de una variación de la temperatura máxima debido al cambio climático, se observa que el impacto en las tres variedades de caña de azúcar del ingenio Tres Valles es una disminución del rendimiento de 10 %. Esta disminución se puede traducir en una pérdida a nivel del ingreso del productor, a nivel agregado una reducción en el valor de la producción y una menor disponibilidad de azúcar estándar para satisfacer la demanda, lo que puede poner en riesgo la seguridad alimentaria del país.

Análogamente, en el Cuadro 7 se observa que un incremento de la precipitación en 100 mm trae un incremento en la producción de caña de azúcar de 5 %.

Finalmente, en el Cuadro 8 se observa como una disminución de la radiación solar por efecto del cambio climático trae una disminución en el rendimiento de caña de azúcar de las tres variedades de 8 %.

Al comparar los resultados de la presente investigación a la luz de otras investigaciones, en primer lugar es necesario señalar que a la fecha en México no existe ningún estudio que utilice el DSSAT/Canegro para evaluar los efectos del cambio climático en los rendimientos de biomasa de la caña de azúcar. Izquierdo-Hernández *et al.* (2024) evaluaron la dinámica del crecimiento de tres variedades (Mex 69-290, Mex 79-431 y CP 72-2086) de caña de azúcar en la fase de plantilla y soca en el área de abastecimiento del ingenio Santa Rosalía, Tabasco, México. En el estudio también se simuló el porcentaje de cobertura y rendimiento de biomasa de los tallos de las tres variedades utilizando el modelo de simulación Aquacrop, de lo cual concluyeron que dicho modelo de simulación es una herramienta útil y confiable para predecir la biomasa de los tallos. Verma *et al.* (2023) simularon y evaluaron, mediante el análisis de sensibilidad, el impacto de las variaciones de los

principales parámetros climáticos, (temperatura máxima, temperatura mínima, radiación solar y concentración de dióxido de carbono) sobre el rendimiento de la caña de azúcar utilizando el modelo DSSAT/Canegro en el Distrito de Muzaffarnagar, India. El principal hallazgo fue que el incremento en los valores de temperatura máxima y mínima resultó en una disminución gradual del rendimiento, mientras que el incremento en la radiación solar mostró un aumento en el rendimiento. Yindi *et al.* (2025) evaluaron cuatro genotipos de caña de azúcar en Chaiyaphum, Tailandia en dos fechas de siembra utilizando el DSSAT/Canegro para calibrar coeficientes genéticos con datos de campo de 2020 y 2021. La calibración del modelo mostró un d-stat (índice de Willmott) mayor que 0.8 indicando una alta precisión entre los datos simulados y los observados en peso seco de tallo, altura y contenido de sacarosa; además Mulla y Singh (2025) evaluaron la resiliencia de la caña de azúcar en Padegaon, India bajo el escenario climático RCP 4.5 integrando simulaciones DSSAT con predicción estadística vía Random Forest; en sus resultados reportaron una reducción proyectada del rendimiento de -12.4 % y del contenido de sacarosa de -9.8 % hacia 2098, atribuida principalmente al aumento de temperaturas máximas.

En el estudio se sugieren ajustes en fechas de siembra y selección de genotipos tolerantes al calor; sin embargo, los autores no abordaron críticamente la representatividad local del escenario ni las limitaciones del enfoque híbrido. Finalmente Noriega-Navarrete *et al.* (2021) analizaron el desempeño del modelo DSSAT-CERES-Maize en escenarios climáticos globales y reportaron reducciones de rendimiento de hasta 61 % en Latinoamérica y 49.3 % en México bajo condiciones adversas, así como incrementos de 5 a 22 % cuando se consideró la fertilización carbónica. Estos resultados refuerzan la necesidad de validar modelos en contextos locales y contrastar sus proyecciones con datos observados, especialmente al integrar escenarios genéricos como RCP en cultivos sensibles como el maíz.

## CONCLUSIONES

El estudio mostró que el crecimiento de la caña de azúcar en un periodo de 39 años mediante simulación con el modelo DSSAT/Canegro se ve impactado por el incremento de la temperatura máxima en 2 °C pues el rendimiento de la caña de azúcar disminuirá en 10 %; así mismo, éste se incrementará en 5 % si la precipitación se incrementa en 100 mm y disminuirá en 8 % si la radiación solar disminuye 10 %.

**Cuadro 6. Impacto en las variedades de caña de azúcar del ingenio Tres Valles, Veracruz, México por un aumento de 2 °C en la temperatura máxima.**

Variedad y rendimiento	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )		
	Línea de base	Impacto: Disminución del 10%	Final
CP 72-2086			
Promedio	80	8.0	72.0
Máximo	95	9.5	85.5
Mínimo	60	6.0	54.0
MEX 69-290			
Promedio	75	7.5	67.5
Máximo	90	9.0	81.0
Mínimo	55	5.5	49.5
ITV 92-373			
Promedio	85	8.5	76.5
Máximo	100	10.0	90.0
Mínimo	65	6.5	58.5

**Cuadro 7. Impacto en las variedades de caña de azúcar del ingenio Tres Valles, Veracruz, México por un incremento de 100 milímetros de precipitación**

Variedad y rendimiento	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )		
	Línea de base	Impacto: Aumento de 100 mm	Final
CP 72-2086			
Promedio	80	4.0	84.0
Máximo	95	4.8	99.8
Mínimo	60	3.0	63.0
MEX 69-290			
Promedio	75	3.8	78.8
Máximo	90	4.5	94.5
Mínimo	55	2.8	57.8
ITV 92-373			
Promedio	85	4.3	89.3
Máximo	100	5.0	105.0
Mínimo	65	3.3	68.3

**Cuadro 8. Impacto en las variedades de caña de azúcar del ingenio Tres Valles, Veracruz, México por una reducción de la radiación solar en 10 %.**

Variedad y rendimiento	Línea de base	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	
		Impacto Disminución del 8 %	Final
CP 72-2086			
Promedio	80	6.4	73.6
Máximo	95	7.6	87.4
Mínimo	60	4.8	55.2
MEX 69-290			
Promedio	75	6.0	69.0
Máximo	90	7.2	82.8
Mínimo	55	4.4	50.6
ITV 92-373			
Promedio	85	6.8	78.2
Máximo	100	8.0	92.0
Mínimo	65	5.2	59.8

### AGRADECIMIENTOS

Al CONAHACYT por el apoyo financiero para la realización de la estancia posdoctoral del primer autor, que ha permitido la realización de la presente investigación.

### BIBLIOGRAFÍA

- Anawar H. M. and V. Strezov (2019) Modeling of sustainable energy system from renewable biomass resources in response to technical development, lifecycle assessment, cost, and availability. *In: Renewable Energy Systems from Biomass: Efficiency, Innovation, and Sustainability*. V. Strezov and H. M. Anawar (eds.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp:15-34.
- Arnold J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah and J. R. Williams (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34:73-89, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Bhengra A. H., M. K. Yadav, C. Patel, P. K. Singh, K. K. Singh and R. S. Singh (2016) Calibration and validation study of sugarcane (DSSAT-Canegro V4.6.1) model over North Indian region. *Journal of Agrometeorology* 18:234-239, <https://doi.org/10.54386/jam.v18i2.940>
- Cervantes-Preciado J. F., N. Milanés-Ramos and M. A. Castillo (2019) Evaluation of 11 hybrids of sugar cane (*Saccharum* spp.) in the central region of Veracruz, Mexico. *Agroproductividad* 12:69-73, <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1085>
- CNIAA, Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera (2024) Manual Azucarero Mexicano. Edición 2024. Compañía Editorial del Manual Azucarero. Ciudad de México. 417 p.
- Gilbert R. A., C. R. Rainbolt, D. R. Morris and J. M. McCray (2008) Sugarcane growth and yield responses to a 3-month summer flood. *Agricultural Water Management* 95:283-291, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.10.009>
- Gobierno del Estado de Veracruz (2023) Cuadernillo municipal de Tres Valles, Veracruz. Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz (SIEGVER), Subsecretaría de Planeación. Xalapa, Veracruz, México. [https://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Tres-Valles\\_CM\\_Ver\\_2023.2.pdf](https://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Tres-Valles_CM_Ver_2023.2.pdf) (Noviembre 2025).
- Holzworth D. P., N. I. Huth, P. G. deVoil, E. J. Zurcher, N. I. Herrmann, G. McLean, ... and B. A. Keating (2014) APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software* 62:327-350, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Hoogenboom G., C. H. Porter, V. Shelia, K. J. Boote, U. Singh, J. W. White, ... and J. W. Jones (2019) Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5. DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA. <https://dssat.net> (August 2024).
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021) La Industria Azucarera. Censos Económicos 2019. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. 75 p.
- Izquierdo-Hernández J., S. Córdoba-Sánchez, L. C. Lagunes-Espinoza, D. J. Palma-López y J. J. Peña C. (2024) Análisis del crecimiento de cultivares de caña de azúcar a través de la evaluación del rendimiento y materia seca. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 27:032, <http://doi.org/10.56369/tsaes.5129>
- Jones J. W. and A. Singels (2008) DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module. User Documentation. International Consortium for Sugarcane Modelling. Brisbane, Australia. 57 p.
- Jones M. R. and A. Singels (2018) Refining the Canegro model for improved simulation of climate change impacts on sugarcane. *European Journal of Agronomy* 100:76-86, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.009>
- Jones J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, ... and J. T. Ritchie (2003) The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Kondylis F., V. Mueller and J. Zhu (2017) Seeing is believing? Evidence from an extension network experiment. *Journal of Development Economics* 125:1-20, <https://doi.org/10.1016/j.jdevco.2016.10.004>
- Kosamkar P. K. and V. Y. Kulkarni (2019) Agriculture crop simulation models using computational intelligence. *International Journal of Computer Engineering and Technology* 10:134-140, <https://doi.org/10.34218/ijcet.10.3.2019.015>
- Kucharik C. J. (2003) Evaluation of a process-based agro-ecosystem

- model (Agro-IBIS) across the U. S. Corn Belt: simulations of the interannual variability in maize yield. *Earth Interactions* 7:1-33, [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:EOAPAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:EOAPAM>2.0.CO;2)
- Liu J., J. Wu, D. Jiang, S. Chen, M. Hao, F. Ding, ... and H. Liang (2025) Research on the impact of climate change on food security in Africa. *Scientific Reports* 15:31251, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14560-5>
- Maat H. (2011) The history and future of agricultural experiments. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences* 57:187-195, <https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.11.001>
- Marin F. R., J. W. Jones, F. Royce, C. Suguitani, J. L. Donzeli, W. J. Pallone and D. S. Nassif (2011) Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. *Agronomy Journal* 103:304-315, <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0302>
- Martínez-Ballesteros J., O. Castañeda-Castro, J. V. Hidalgo-Contreras y F. C. Gómez-Merino (2023) Efectos bioestimulantes del aluminio en crecimiento y metabolismo de caña de azúcar *in vitro*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 46:177-186, <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.2.177>
- Matthews B. R., M. Rivington, S. Muhammed, A. C. Newton and P. D. Hallett (2013) Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: the role of crop modelling. *Global Food Security* 2:24-28, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.11.009>
- Mulla S. and S. K. Singh (2025) Decoding climate change: modeling resilience of sugarcane in Padegaon (Maharashtra), India with DSSAT and Random Forest. *MAUSAM* 76:431-448
- NASA, National Aeronautics and Space Administration (2024) NASA prediction of worldwide energy resources. The POWER Project. Hampton, Virginia, USA. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/?fbclid=IwAR1gVVK6FgaLg3vIodmtMhtkEHfByZ1GbaHwPEGj5qu> (January 2025).
- Noriega-Navarrete J. L., R. Salazar-Moreno e I. L. López-Cruz (2021) Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12:127-140, <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2552>
- Pielke R. A. (2004) What is climate change? *Energy & Environment* 15:515-520, <https://doi.org/10.1260/0958305041494576>
- Saldivia-Tejeda A., M. Á. Uribe-Guerrero, J. M. Rojas-Cruz, O. G. M. Guera, N. Verhulst and S. Fonteyne (2024) Conservation agriculture enhances maize yields and profitability in Mexico's semi-arid highlands. *Scientific Reports* 14:29638, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80928-8>
- SE, Secretaría de Economía (2012) Análisis de la Situación Económica, Tecnológica y de Política Comercial del Sector de Edulcorantes en México. Secretaría de Economía. México, D. F. 94 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/) (Julio 2024).
- Singels A., M. Jones and M. van der Berg (2008) DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module: Scientific Documentation. International Consortium for Sugarcane Modelling. Brisbane, Australia. 34 p.
- Steduto P., T. C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres (2009) AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101:426-437, <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Trenberth K. E. (2018) Climate change caused by human activities is happening and it already has major consequences. *Journal of Energy & Natural Resources Law* 36:463-481, <https://doi.org/10.1080/02646811.2018.1450895>
- Verma A. K., P. K. Garg, K. S. H. Prasad and V. K. Dadhwal (2023) Variety specific sugarcane yield simulations and climate change impacts on sugarcane yield using DSSAT-CSM-CANEGRO model. *Agricultural Water Management* 275:108034, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108034>
- Yindi N., N. Jongrunklang, P. Songsri, P. Phoncharoen, P. Klomsa-ard and P. Banterng (2025) Growth analysis and simulation approach for sugarcane genotypes grown under different growing seasons. *Sugar Tech* 27:1335-1350, <https://doi.org/10.1007/s12355-025-01585-3>
- Zhong C. X. (2016) Causes of global climate change. *International Journal of Global Warming* 10:482-495, <https://doi.org/10.1504/ijgw.2016.079w784>