

## **Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático**

José Luis Noriega-Navarrete  
Raquel Salazar-Moreno<sup>§</sup>  
Irineo Lorenzo López-Cruz

<sup>1</sup>Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua-Universidad Autónoma Chapingo. Edificio Efraín Hernández Xolocotzi, PB. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. (luisnoriegan@hotmail.com; loci61@hotmail.com).

<sup>§</sup>Autora para correspondencia: rsalazarm@chapingo.mx.

### **Resumen**

El cambio climático (CC) afecta las condiciones meteorológicas actuales y repercute negativamente en el rendimiento de maíz, particularmente de temporal. Para estimar los efectos del CC en la productividad, se han utilizado modelos de simulación de crecimiento bajo diferentes escenarios de cambio climático. En este artículo se hace una revisión sobre modelos implementados globalmente, durante el periodo 2006 a 2019; a través, de Scopus y Google Académico. Los modelos reportados son mecanicistas, dinámicos y estocásticos, como DSSAT-CERES-Maize, APSIM-Maize, CropSyst, AquaCrop, EPIC-Maize, CropWat InfoCrop y WOFOST. Las simulaciones en diversos escenarios reportan disminución del rendimiento de maíz en África Subsahariana (78%), China (70%), Latinoamérica (61%) y Medio Oriente (45%), e incrementos en la Unión Europea (71%), Cinturón Maicero Estadounidense (57%), Medio Oriente (45%) e India (44.5%). En México, se tienen estimaciones de incremento en los rendimientos de maíz desde 5 a 22% considerando los efectos de la fertilización carbónica, y reducciones de hasta de 49.3% bajo otras condiciones. Se requiere profundizar en estudios sobre efectos de CC en las diferentes regiones del país, e implementar modelos que puedan utilizarse para el diseño de políticas y estrategias de adaptación y mitigación, ante los efectos negativos del CC en la agricultura mexicana.

**Palabras clave:** Biosistemas, DSSAT-CERES-Maize, modelación matemática.

Recibido: enero de 2021

Aceptado: febrero de 2021

## Introducción

El cambio climático (CC) se refiere a la modificación en las variables climáticas, atribuidas directa o indirectamente a las actividades humanas, que alteran la composición física y química de la atmósfera terrestre, como resultado de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), por crecimiento económico y demográfico de la humanidad, desde la Revolución Industrial hasta la actualidad (IPCC, 2014). Debido a lo anterior, se prevé una serie de efectos negativos en las condiciones ambientales futuras, en distintos sectores, en magnitudes e intensidades distintas en el orbe (Fuhrer and Gregory, 2014; Venkateswarlu and Singh, 2015).

En México, se ha pronosticado una reducción en la cantidad y distribución de lluvia, incremento de la temperatura, aumento de la presencia e intensidad de eventos extremos (sequías y ciclones tropicales) (BID, 2014; Ruíz *et al.*, 2016). Estos fenómenos influyen directamente en la productividad del maíz, como consecuencia de la modificación en la evapotranspiración y demanda hídrica del cultivo e incremento de los grados días de desarrollo (GDD) (López *et al.*, 2013).

Debido a lo anterior, el IPCC (2014) ha considerado a la agricultura de temporal, incluido el cultivo de maíz, como un sector altamente vulnerable a los efectos negativos derivados del CC (Velasco y Celis, 2012). México ha firmado compromisos internacionales como el Acuerdo de París con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura por debajo de 1.5 °C y de esta forma minimizar los impactos negativos del CC.

El maíz (*Zea mays* L.) es el principal cereal cultivado a nivel mundial, México ocupa el octavo lugar en volumen producido (FAO, 2019). En el año 2018, se cosecharon 27.17 millones de toneladas en 50.39% de la superficie nacional sembrada, en donde 78.4% de la producción nacional de maíz es bajo condiciones de temporal, con un rendimiento promedio de 2.46 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2019).

Con el fin de analizar la respuesta de los cultivos ante condiciones climáticas cambiantes en una región, existen modelos cuyos pronósticos proporcionan información, para implementar medidas que reduzcan los impactos negativos del CC (Jones *et al.*, 2000). Los modelos de simulación reproducen matemáticamente el comportamiento fisiológico y biofísico del maíz y simulan una respuesta ante diferentes condiciones ambientales (Teh, 2006; Soltani and Sinclair, 2012).

De acuerdo con Bouman *et al.* (1996) los modelos reflejan tres situaciones en un cultivo: 1) producción potencial, limitada únicamente por la temperatura ambiental, la radiación y la concentración de CO<sub>2</sub> en interacción con el genotipo de la planta; 2) producción limitada, dada por la disponibilidad limitada de agua o nutrientes; y 3) producción real, la cual adiciona el efecto biológico producido por la interacción con plagas, enfermedades y malezas.

El objetivo del presente ensayo consiste en realizar una revisión de estado del arte sobre los modelos de simulación del crecimiento y rendimiento de maíz, implementados para estimar el impacto bajo escenarios de CC a nivel mundial. Se consultaron artículos publicados desde la formalización del Programa de Trabajo de Nairobi sobre los efectos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, posterior a la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto (2006) hasta la fecha (2019). Se realizó una búsqueda a través de Scopus (<https://www.scopus.com>) y Google Académico (<https://scholar.google.com>), con las palabras ‘climate change’, ‘modelling’, ‘model’ y ‘maize’ sin considerar literatura gris (Rötter *et al.*, 2018).

De los 58 340 resultados obtenidos se seleccionaron los modelos APSIM-Maize (Agricultural Production Systems sIMulator), AquaCrop (modelo de crecimiento de cultivos para mejorar la productividad hídrica, desarrollado por la FAO), CropSyst (Cropping Systems simulator), CropWat (Crop Water Productivity Model), DSSAT-CERES-Maize (Decision Support System for Agrotechnology Transfer-Crop Environment Resource Synthesis), EPIC-Maize (Erosion Productivity Impact Calculator), InfoCrop (modelo dinámico de rendimiento de cultivos desarrollado por la Universidad de Wageningen en Holanda) y WOFOST (WORld FOod STudies, desarrollado por la Universidad de Wageningen en Holanda).

### **Modelos de crecimiento y rendimiento de maíz bajo condiciones de cambio climático**

El presente ensayo consta de cuatro partes: 1) modelos matemáticos usados para la simulación del crecimiento y rendimiento de cultivos; 2) modelos usados en escenarios de cambio climático; 3) simulación regional para la estimación del rendimiento de maíz bajo escenarios de cambio climático; y 4) análisis de la aplicación de dichos modelos en México.

### **Modelos matemáticos usados para la simulación del crecimiento y rendimiento de cultivos**

El uso de modelos matemáticos en los sistemas biológicos permite incrementar el conocimiento del sistema y mejorar su comportamiento mediante la optimización y control (Haeffner, 2005; Hannon y Ruth, 2014), lo que ha ayudado a comprender práctica, rápida y sintéticamente, la complejidad de los procesos biofísicos que ocurren en los sistemas agrícolas, en diferentes escenarios y en lapsos de tiempo determinados (Long and Stitt, 2013; Van Esse *et al.*, 2013).

Teh (2006) y Soltani and Sinclair (2012), clasifican a los modelos basados en cuatro criterios: por la forma de representar los procesos (mecanicistas o empíricos), por la respuesta obtenida respecto al tiempo (dinámicos o estáticos), por la respuesta observada (discretos o continuos) y por la aleatoriedad (determinísticos o estocásticos).

Los modelos mecanicistas, explican y describen procesos generales del sistema, como el crecimiento y el rendimiento, bajo condiciones altamente no lineales, mientras que los empíricos o estadísticos, relacionan dos variables entre sí. Los modelos dinámicos predicen condiciones futuras del sistema, puesto que las estimaciones son producidas a lo largo del tiempo y los estáticos no consideran el tiempo.

Por último, los modelos deterministas, funcionan de la misma manera para un conjunto dado de condiciones iniciales mientras que, en los estocásticos, se incluye la aleatoriedad y describen los estados de variables por distribuciones de probabilidad, en donde la respuesta del cultivo cambia debido a las variaciones en las variables de entrada al sistema.

### **Modelos usados en escenarios de cambio climático**

Los modelos de simulación permiten conceptualizar claramente los efectos del CC en los cultivos, aunque tienen como limitante la disponibilidad de datos observados para compararlos con los resultados obtenidos del modelo (Challinor *et al.*, 2009). Para cuantificar localmente estos efectos, Murthy (2004) propuso modelos de predicción del crecimiento de cultivos, que estiman la producción, el rendimiento y las estrategias adaptativas de los mismos, a partir del análisis de variables climatológicas (temperaturas máxima, mínima, precipitación, radiación, CO<sub>2</sub>), edáficas y agronómicas, en zonas geográficas y periodos de tiempo específicos (White *et al.*, 2011).

Los modelos de circulación general (GCM), que simulan numéricamente la dinámica de los componentes del sistema climático, principalmente la atmósfera y el océano, han sido utilizados para realizar las proyecciones climáticas futuras bajo condiciones de CC. A los modelos anteriores, se les han aplicado técnicas de aumento de resolución y disminución de escala, con lo cual se han desarrollado los modelos climáticos regionales (RCM) o el modelo de acoplamiento ponderado reliability ensemble averaging (REA), con el objetivo de determinar los efectos locales a partir de los cambios globales (Fernández *et al.*, 2015; Martínez, 2016).

Para conocer el impacto del CC en distintas áreas, se han propuesto escenarios de CC, con los cuales es posible producir los datos necesarios relacionados al clima futuro, y con ellos, evaluar los modelos a partir, de las emisiones de GEI (Mo'allim *et al.*, 2016). De acuerdo con Fernández *et al.* (2015), los escenarios de cambio climático son representaciones alternativas y simplificadas de lo que podría acontecer en el futuro, y son un instrumento utilizado en la investigación del impacto potencial de las emisiones futuras de GEI antropogénicos mediante la simulación.

Los escenarios son definidos como la diferencia entre un contexto futuro y la climatología actual. Es importante destacar, que no son pronósticos climáticos, sino más bien, representan alternativas del comportamiento climático futuro. El IPCC propuso inicialmente el informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES), basado en cambios demográficos, desarrollo socioeconómico y cambios tecnológicos, en el cual se encontraban agrupados cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios (A1, A2, B1, B2).

La línea evolutiva y familia de escenarios A1, considerada como desfavorable, asumía un rápido crecimiento económico y un máximo crecimiento poblacional hacia mitad del siglo; tenía algunas variantes, como el uso intensivo de combustibles fósiles (A1F1), el uso equilibrado de combustibles fósiles con energías limpias (A1B) y el uso exclusivo de energías renovables (A1T). La línea evolutiva y familia de escenarios A2 se refiere a un mundo heterogéneo con un crecimiento poblacional continuo.

La línea evolutiva y familia de escenarios B1, considerada como favorable, describe una población que crece a mediados de siglo y posteriormente decrece, con dependencia tecnológica menos intensiva combinada con el uso de tecnologías limpias y uso eficaz de los recursos. Finalmente, la línea evolutiva y familia de escenarios B2, describe un mundo sostenible, aunque con un aumento de la población a un ritmo menos acelerado que en A2.

A partir del 5° informe del IPCC, a finales del 2013, estos escenarios socioeconómicos fueron sustituidos por las trayectorias de concentraciones representativas (RCP), por sus siglas en inglés, referidas al aumento global del desbalance entre la energía radiativa entrante y la saliente del sistema terrestre (forzamiento radiativo), medido en  $W m^{-2}$  (Moss *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 2015).

Estas nuevas proyecciones de las RCP's están basadas en las emisiones de GEI antropogénicas derivadas del desarrollo socioeconómico y demográfico, que describen el cálculo del incremento del forzamiento radiativo total por medio de cuatro trayectorias hasta final del Siglo XXI comparado con el año 1750 (IPCC (2014). Así, los actuales escenarios de CC, consideran las proyecciones futuras bajo distintos casos de forzamiento radiativo terrestre ( $W m^{-2}$ ) y son denominados como RCP's.

De esta forma, se cuenta actualmente con un escenario de mitigación que considera un incremento de  $2.6 \text{ W m}^{-2}$  (RCP 2.6), el cual ha quedado rebasado por las condiciones actuales, uno de estabilización de emisiones de GEI que considera el aumento en  $4.5 \text{ W m}^{-2}$  (RCP 4.5), otro realista, con un incremento de  $6 \text{ W m}^{-2}$  (RCP 6) y un último extremo, que considera las más altas emisiones de GEI, cuyo incremento es de  $8.5 \text{ W m}^{-2}$  (RCP 8.5) (Fernández *et al.*, 2015).

### Modelos usados para la simulación del crecimiento de maíz en escenarios de cambio climático

El uso de la información proveniente de los distintos modelos matemáticos permite a los tomadores de decisiones locales, contar con herramientas adecuadas para reducir los efectos negativos del CC ante el riesgo e incertidumbre de los escenarios de CC (IPCC, 2014). Cada uno de estos modelos presenta características particulares en su estructura y funcionamiento interno, siendo algunos más complejos que otros, en cuanto al requerimiento de información de entrada para alimentar el sistema, así como con la interfaz del usuario final.

En el Cuadro 1 se describen las diferentes variantes que pueden existir en un modelo como: tipo de modelo (TM) según producción simulada: potencial (P), limitada (L), real (R). Factor limitante (FL): estrés hídrico (H); térmico (T); por nitrógeno (N); por oxígeno (Ox); salino (S); lumínico (L). Cálculo del rendimiento (CR): índice de cosecha (IC); biomasa (aérea) total (B); número de granos y tasa de crecimiento de grano (Gn); partición durante las etapas reproductivas (Rt) y partición post antesis (Rta).

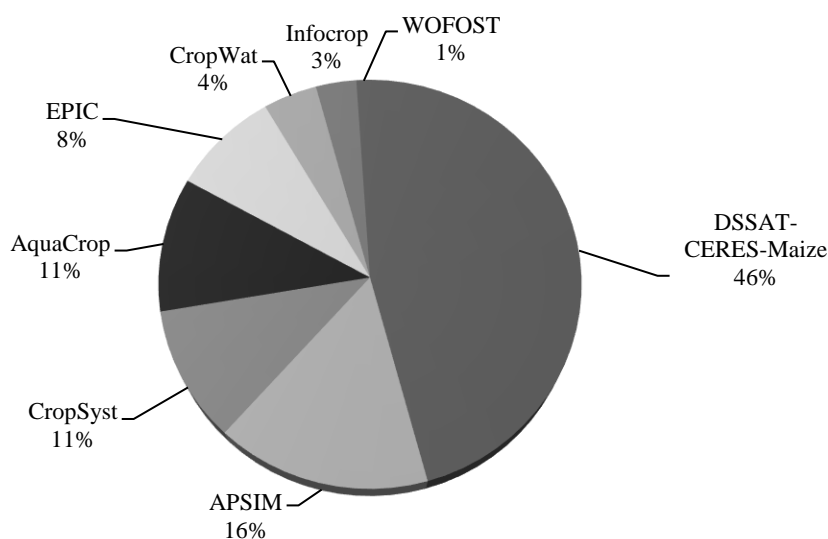
**Cuadro 1. Características de los modelos de simulación de crecimiento y rendimiento de maíz utilizados en escenarios de cambio climático.**

Modelo	TM	FL	CR	FC	ETP	N	VEM	NVE
APSIM	PL	HOxT	Prt	TFP	PT	5	PTMtmRS	7
AquaCrop	PL	HNTS	BIC	T	PM	13	PTMtmRS	4
CropSyst	PL	HTNL	ICBRta	TFP	PM	13	PTMtmPrRSV	4
CropWat	PL	H	ICBRt	TO	PM	3	PTMtmSV	-
DSSAT-CERES-Maize	PL	HNOx	Gn	TFP	PM	6	RTMtmRS	4
EPIC	PLR	HTN	ICB	TFP	PM	59	RSTMtmHRV	27
InfoCrop	PLR	HNT	BGnRt	TFP	PM	10	PTMtmRSeV	22
WOFOST	PL	HOxN	RtB	TFP	P	6	TMtmRSeV	7

Fenología de cultivo (FC): función de: temperatura (T), fotoperiodo (FP); otros efectos -estrés hídrico o nutrimental- (O). Evapotranspiración potencial (ETP): calculada por las ecuaciones de Penman (P); Penman-Monteith (PM); Priestley-Taylor (PT). Número de parámetros considerados en el modelo (N). Variables de entrada -climáticas- consideradas en el modelo (VEM): precipitación (P); temperatura máxima (TM); temperatura mínima (tm); temperatura de punto de rocío (Pr); radiación solar (RS); presión de vapor (e), humedad relativa (HR); velocidad del viento (V); fracción de horas de sol (S); y evapotranspiración potencial (ET).

Número de variables de estado del modelo (NVE), (Williams *et al.*, 1989; Van Evert and Campbell, 1994; Jones *et al.*, 2003; Keating *et al.*, 2003; Aggarwal *et al.*, 2006a; Aggarwal *et al.*, 2006b; Boogaard *et al.*, 2011; FAO, 2012; Hoogenboom *et al.*, 2019).

De la búsqueda realizada, se encontraron 94 artículos publicados relacionados con la producción de maíz en escenarios de cambio climático, en distintas regiones del mundo. Por la cantidad de artículos publicados, destacaron los modelos DSSAT-CERES (43), APSIM (15), CropSyst (10), Aquacrop (10) y EPIC (8), que conjuntamente representan 92% del total de publicaciones analizadas (Figura 1).



**Figura 1. Porcentaje de artículos reportados por modelo utilizados para la simulación del crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático durante el periodo 2006-2019.**

Los modelos DSSAT-CERES-Maize (Universidades de Georgia y Florida), APSIM (Universidad de Queensland), CropSyst (Universidad de Washington) y EPIC (Centro de Investigación Texas A-M Agrilife) clasificados como modelos mecanicistas dinámicos, de estructura cerrada, ofrecen la ventaja de no requerir el pago de licencias para su uso, cuentan con una interfaz amigable y simulan el crecimiento y rendimiento del maíz con amplia gama de interacciones entre la planta, clima, suelo y manejo agronómico, así como la facilidad para simular los efectos del CC sobre el cultivo.

El modelo AquaCrop (FAO) ha sido utilizado últimamente debido a que es un software de libre acceso, requiere una menor cantidad de detalles y especificaciones de las variables de entrada, por lo que es útil en regiones donde no existe disponibilidad de datos de entrada, ya sea de clima, suelo o del cultivo y que éstos sean de buena calidad y en cantidad suficiente para realizar las simulaciones, como ocurre en México.

El modelo CropWat (FAO), aunque poco utilizado con fines de simulación en escenarios de CC (4%), fue diseñado con fines de riego y simula el consumo de agua del cultivo y su consecuente lámina de riego. El modelo WOFOST (Universidad de Wageningen), reportó 1% de los artículos analizados, tiene la ventaja de ser un programa abierto, de libre acceso, que permite modificar a nivel de código su estructura, se pueden realizar ajustes para condiciones particulares, aunque pierde su aplicabilidad general.

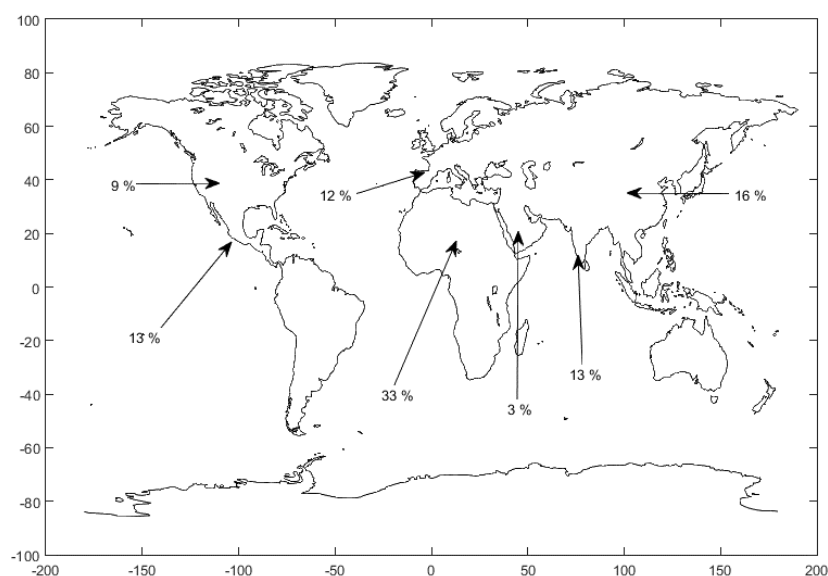
Esta propiedad es favorable en regiones con condiciones muy particulares o específicas, como las microrregiones de México, donde existe una gran agrobiodiversidad de maíces criollos y nativos, los cuales están adaptados a condiciones locales y el uso de estos materiales genéticos es limitado en el tiempo y el espacio geográfico. Lo anterior implica que, para una gran heterogeneidad de ambientes, no es posible utilizar datos que sean válidos en regiones grandes y en donde el cultivo se encuentre bajo condiciones homogéneas.

El modelo Infocrop del Instituto de Investigación Agrícola de la India (IARI), reportó 3% de las investigaciones referentes a CC, se caracteriza por considerar el efecto de plagas y enfermedades sobre los cultivos, elementos que se verán modificados con el cambio de clima en el futuro bajo el efecto de los GEI.

### Simulación regional para la estimación del rendimiento de maíz bajo escenarios de cambio climático

Los artículos fueron agrupados por regiones geográficas: África Subsahariana, China, India, la Unión Europea, Medio Oriente, Latinoamérica, el Cinturón Maicero Estadounidense y Canadá. Los escenarios reportados en las publicaciones fueron A1, A2, A1B, B2 y B1, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5. La mayor cantidad de artículos reportados se concentran en África, donde se han utilizado casi todos los modelos, excepto WOFOST e Infocrop.

En China, los modelos más usados son DSSAT-CERES y APSIM y en menor medida EPIC y CropWat. Para la Unión Europea, se han sido utilizado la mayoría de los modelos, con excepción de CropWat e Infocrop. En la India, destaca el uso del modelo local Infocrop. En Latinoamérica, los estudios realizados en Chile, Argentina, Brasil, Bolivia, Panamá y México han sido reportados en DSSAT-CERES, aunque la región aporta 13% de las publicaciones revisadas (Figura 2).



**Figura 2. Porcentaje de artículos sobre modelos de simulación usados regionalmente para estimar el rendimiento de maíz bajo escenarios de cambio climático.**

Las proyecciones de escenarios de CC en la mayoría de los estudios, estiman la disminución del rendimiento del maíz, en diferentes regiones del mundo, principalmente atribuidos al incremento de la temperatura (Cuadro 2). Esta condición reduce el periodo vegetativo, afecta la polinización e interrumpe la fase de llenado de grano, lo que se traduce en menor producción de materia seca y reducción del rendimiento.

**Cuadro 2. Cambios en los rendimientos promedio de maíz (%) simulado en escenarios de cambio climático.**

Modelo	CH	IN	MO	AS	UE	AL	EU	O
Infocrop	ND	Δ12-45	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CropWat*	Δ9	Δ1.8-26 ▼54	ND	Δ30-110	ND	▼31-38	ND	ND
AquaCrop	ND	ND	ND	Δ 1-20 ▼0.5-30	Δ 17	Δ 10-50 ▼9-11	ND	ND
WOFOST	ND	ND	ND	ND	Δ10-34	ND	ND	ND
CropSyst	ND	Δ1.5-22	ND	Δ3.4-56	Δ 7.3-14 ▼3-53	Δ 48-61 ▼3-8	ND	ND
APSIM	Δ2.5-70 ▼12-86	ND ▼27-45	Δ14-23	Δ0.3-78 ▼201	Δ 20-29	ND	Δ 10-40	Δ 18-80 <sup>δ</sup>
EPIC	Δ20-40 ▼18.6	ND	ND	Δ 4-22 ▼5-20	Δ 5.7-25	ND	ND	Δ4-47 <sup>γ</sup> ▼0.4-43 <sup>γ</sup>
DSSAT-CERES	Δ 4-30 ▼1.4-42	Δ 5-40 ▼7.2-42	Δ 1-45	Δ 0.4-58 ▼1.7-23	Δ 3.5-52 ▼71	Δ 0.1-36 ▼15-22	Δ 5.8-57 ▼1.8-11	ND

CH= comprende la llanura norte de China y Korea; IN= India incluido Bangladesh y Nepal; MO= medio oriente; AS= África subsahariana; UE= Unión Europea; AL= América Latina; EU= Estados Unidos, incluido el cinturón maicero y Canadá, O= Otras; Δ= incremento; ▼= reducción, <sup>δ</sup>= Nueva Zelanda; <sup>γ</sup>= global; \*= cambios expresados en porcentaje de requerimiento hídrico; ND= no disponible.

Pero también, existen regiones donde las condiciones serán favorables y tendrán efectos positivos en el incremento del rendimiento, sobre todo en regiones templadas (Cuadro 2). El pronóstico del incremento en la producción se lograría al considerar el efecto del fertilizante, CO<sub>2</sub> y sin restricciones de agua, situación que no necesariamente se cumplirá.

De acuerdo con Conde *et al.* (2004) se prevé una reducción de la precipitación, de la cual dependen los cultivos de temporal; sin embargo, las variedades de ciclo corto pueden desarrollarse mejor dado que el incremento de la temperatura mínima, reduce el riesgo de heladas.

El rendimiento de maíz simulado con los diferentes modelos, en condiciones de CC tuvo impactos tanto negativos como positivos, para una misma región (Cuadro 2). La variación de las simulaciones obtenidas, se pueden atribuir a la modificación de las condiciones ambientales y no necesariamente al modelo utilizado, como lo demuestran Eitzinger *et al.* (2013), al comparar el rendimiento de maíz mediante DSSAT-CERES-Maize, EPIC, WOFOST, AquaCrop y CropSyst y verificar que estos modelos predicen rendimientos con bajo nivel de incertidumbre.



Los efectos positivos del CC para una misma región pueden ser atribuidos a prácticas de mitigación, como labores culturales, prácticas de conservación de humedad del suelo y agricultura de conservación, el uso de variedades mejoradas, la implementación de sistemas de riego, asociaciones entre cultivos, o el efecto fertilizante del CO<sub>2</sub> atmosférico, las cuales reducen los efectos derivados del incremento de la temperatura y disminución de la precipitación (Cuadro 2).

La condición necesaria para implementar y evaluar los diversos modelos de crecimiento y desarrollo convencionalmente usados en estudios de CC, es que deben ser sometidos por las mismas fases del proceso de generación de un modelo matemático aplicado a los biosistemas: análisis de incertidumbre, análisis de sensibilidad (local y global), estimación de parámetros/asimilación de datos y evaluación, con la finalidad de incrementar su confiabilidad.

En DSSAT-CERES, estos ajustes se realizan particularmente para cada variedad o híbrido de maíz, al estimar los coeficientes genéticos mediante el análisis del estimador generalizado de máxima verosimilitud Generalized Likelihood Uncertainty Estimator (GLUE), por sus siglas en inglés y análisis de sensibilidad, mientras que, en otros como WOFOST, la calibración se realiza en las distintas etapas fenológicas. En cualquier caso, es necesario el uso de datos experimentales para evaluar, calibrar y evaluar el modelo, en escenarios de CC.

Por esta razón, el desarrollo de modelos se considera un arte, cuyo ensamblaje combina habilidades matemáticas para el procesamiento de datos, en un contexto agronómico complejo altamente no lineal, característica de los modelos implementados en un biosistema. La mayoría de los modelos estudiados requieren gran cantidad de variables de entrada y parámetros para la simulación de las variables de estado, lo que se traduce en modelos estructuralmente complejos, con procesos laboriosos, difíciles de ejecutar con un mínimo de datos y con ello, simular adecuadamente.

Por el contrario, modelos simples, con pocas variables de entrada, pueden resultar útiles cuando no se dispone de una buena cantidad de datos, aunque la incertidumbre asociada al resultado es elevada y dejan de ser una herramienta confiable. Para el uso de los modelos de simulación en escenarios de CC, debe reducirse la incertidumbre que se genera en el modelo de cultivo, debido a que en la estimación de los escenarios futuros se agrega más incertidumbre, cuya acumulación puede producir resultados que sobreestimen o subestimación el rendimiento.

Las medidas más utilizadas para evaluar el desempeño del modelo fueron: eficiencia (E) y el cuadrado medio del error de predicción (MSEP) y para estimar la precisión, se utilizaron la varianza o el coeficiente de variación (Wallach *et al.*, 2014).

### **Simulación de rendimiento de maíz bajo escenarios de cambio climático en México**

En México, a pesar de la importancia del cultivo, existen únicamente tres estudios publicados en el periodo estudiado, con las 64 razas nativas de México, corresponde al menos un estudio para cada uno de los escenarios de cambio climático, y al menos un estudio para cada variedad o híbrido comercial sembrado en el territorio nacional (Ruíz *et al.*, 2011a).

Para lograr lo anterior, se requiere del desarrollo de modelos preferentemente mecanicistas, acordes a las condiciones locales y a la disponibilidad de datos, para generar información confiable sobre la producción de maíz proyectada en los escenarios reales (RCP 4.5) y condiciones extremas (RCP

8.5) de CC. Una vez que el modelo ha sido desarrollado, calibrado y evaluado, se pueden diseñar políticas y estrategias de adaptación y mitigación ante los efectos negativos del CC en la agricultura mexicana, sobre todo en condiciones de temporal, a la par que se promueva la soberanía alimentaria.

Conde *et al.* (2004) mediante DSSAT-CERES, estimó un incremento de 5 a 12% y hasta 22% en los rendimientos del maíz para una región templada de México, bajo un escenario ideal (B2). Lo anterior, concuerda con Ruíz *et al.* (2011b), quienes indican que estas regiones se verán favorecidas por los efectos del CC. En contraste, Arce *et al.* (2017), en un escenario extremo (RCP 8.5), estimaron una disminución de 49.3% en el rendimiento del maíz (entre 1 y 1.7 t ha<sup>-1</sup>) mediante AquaCrop, lo cual coloca a la población dependiente de este cultivo en una situación de alto grado de vulnerabilidad.

El impacto negativo influye en las zonas áridas y tropicales, por el incremento térmico y la reducción pluvial (desbalance entre la demanda de agua y la evapotranspiración del maíz), que reduce la acumulación de GDD y la estadía del cultivo en campo (Ruíz *et al.*, 2011a; Ruíz *et al.*, 2016). La investigación enfocada en la simulación de efectos locales del CC en el rendimiento y crecimiento del cultivo de maíz, es primordial dado que la diversidad microclimática de México asociada a la presencia de maíces nativos y criollos son un importante reservorio genético para la obtención de materiales mejorados adaptados al cambio climático.

Asimismo, es necesaria la evaluación en campo de estrategias de adaptación al CC como: 1) cambios en la fecha de siembra acorde con la estación de crecimiento del cultivo; 2) uso eficiente del agua de riego; y 3) implementación de acciones de mitigación como la agricultura de conservación y labranza cero, cambio de prácticas culturales y medidas de protección ante eventos climáticos extremos.

México es pionero en Latinoamérica en el avance legislativo de temas de CC; sin embargo, aún falta por desarrollar estudios relacionados con la modelación de los efectos negativos del CC en la producción de maíz, a fin de que los tomadores de decisiones establezcan medidas con bases científicas, acordes al contexto de la producción agrícola mexicana.

Los avances en la investigación de los rendimientos de maíz y de otros cultivos bajo escenarios de CC, son fundamentales para los miembros del IPCC y los expertos nacionales, para la obtención de medidas de adaptación y mitigación necesarias para abatir los efectos negativos del CC en diversas regiones.

## Conclusiones

Existen diversos modelos matemáticos implementados para simular el crecimiento y rendimiento del maíz que, por sus características, pueden ser usados como herramientas computacionales para estimar los rendimientos del maíz en escenarios futuros de cambio climático. Los principales modelos evaluados para este fin fueron: DSSAT-CERES, APSIM, CropSyst, Aquacrop y EPIC. Cada uno, estima tanto incrementos como disminuciones en el rendimiento, esta variación depende del conjunto de factores considerados en la simulación matemática.

Se considera que las regiones más afectadas en el rendimiento futuro de maíz podrían ser África, China, la Unión Europea e India, con disminuciones máximas de 201%, 86%, 71% y 45% respectivamente; para Latinoamérica, se estima una reducción de 38%.

Particularmente México, es una región con alto grado de vulnerabilidad debido a la megabiodiversidad, posición geográfica y condiciones socioeconómicas y culturales y pese a la importancia del maíz para la población mexicana, existen pocos estudios de caso y simulaciones recientes que estimen el efecto del cambio climático en la producción de este cereal en los diferentes escenarios de cambio climático.

Para que los rendimientos simulados de maíz sean validados, los modelos, deben ser calibrados y evaluados, para cada una de las condiciones locales, de manera que sea factible obtener resultados regionales acerca de los efectos del cambio climático global. Se recomienda que los modelos empleados sean mecanicistas, dinámicos, y de código abierto.

Los resultados obtenidos de la modelación del biosistema pueden ser usados por los tomadores de decisiones, para establecer medidas de adaptación y estrategias de mitigación ante los efectos negativos del cambio climático a nivel local en la producción de maíz e incluso, aprovechar los beneficios que pudieran existir.

## Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido durante los estudios de doctorado, dentro de los cuales fue desarrollada la presente investigación.

## Literatura citada

- Aggarwal, P. K.; Banerjee, B.; Daryaei, M. G.; Bhatia, A.; Bala, A.; Rani, S.; Chander, S.; Pathak, H. and Kalra, N. 2006b. InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments II. Performance of the model. *Agric. Systems.* 89(1):47-67. doi:10.1016/j.agsy.2005.08.003.
- Arce, A. R.; Monterroso, A. I.; Góme, J. D and Palacios, M. A. 2017. Potential yields of maize and barley with climate change scenarios and adaptive actions in two sites in Mexico. *In: advances in information and communication technologies for adapting agriculture to climate change. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Angelov, P. (Ed.). Springer. Cham. 197-208. doi:10.1007/978-3-319-70187-5-15.
- BID. 2014. Banco Interamericano de Desarrollo. El cambio climático y el BID: creación de resiliencia y reducción de emisiones. Oficina de Evaluación y Supervisión (OVE) BID. Washington, USA. 87 p.
- Boogaard, H. L.; De-Wit, A. J. W.; Te-Roller, J. A. and Van-Diepen, C. A. 2011. User's guide for the Wofost Control Centre 1.8 and Wofost 7.1.3 crop growth simulation model. Alterra, Wageningen University and Research Centre Wagenigen. Wagenigen, The Neatherlands. 137 p.

- Bouman, B. A. M.; van-Keulen, H.; van-Laar, H. and Rabbinge, R. 1996. The 'school of de wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric. Systems*. 52(2-3):171-198. doi:10.1016/0308-521X(96)00011-X.
- Challinor, A. J.; Ewer, F.; Arnold, S.; Simelton, E. and Fraser, E. 2009. Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulations impacts and informing adaptation. *J. Exp. Bot.* 60(10):2775-2789. Doi:10.1093/jxb/erp062.
- Conde, C.; Ferrer, R. M. y Liverman, D. 2004. Impacto del cambio climático en la agricultura en México. *In: cambio climático: una visión desde en México*. Martínez, J. y Fernández A. (Ed.). Instituto Nacional de Ecología (INE)-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, DF. 227-238 pp.
- Eitzinger, J.; Thaler, S.; Schmid, E.; Strauss, F.; Ferrise, R.; Moriondo, M.; Bindi, M.; Palosuo, T.; Rötter, R.; Kersebaum, K. C.; Olesen, J. E.; Patil, R. H.; Şaylan, L.; Çaldağ, B. and Çaylak, O. 2013. Sensitivities of crop models to extreme weather conditions during flowering period demonstrated for maize and winter wheat in Austria. *J. Agric. Sci.* 151(6):813-835. doi:10.1017/S0021859612000779.
- FAO. 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Aqua Crop Version 4.0. Reference Manual FAO. Roma, Italia. 164 p.
- FAO. 2019. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crops Data FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.
- Fernández, E. A.; Zavala, H. J.; Romero, C. R.; Conde, A. A. C. and Trejo, V. R. I. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS)-Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 22 p.
- Fuhrer, J. and Gregory, P. J. 2014. Climate change impact and adaptation in agricultural systems introduction. *In: climatic change impact and adaptation in agricultural systems*. Fuhrer, J. and Gregory, P. J. (Ed.). CABI Climate Chance Series 5. USA. 1-6 pp.
- Haeffner, J. W. 2005. Modeling biological systems. Principles and applications 2<sup>nd</sup> (Ed.). New York, USA. Springer Science Business Media Inc. 3-16 pp.
- Hannon B. and Ruth, M. 2014. Modeling dynamic biological systems. *In: modeling dynamic biological systems*. Hannon, B. and Ruth, M. Springer International Publishing. Cham. 3-28 pp. doi: 10.1007/978-3-319-05615-9.1.
- Hoogenboom, G.; Porter, C. H.; Shelia, V.; Boote, K. J.; Singh, U.; White, J. W.; Hunt, L. A.; Ogesi, R.; Lizaso, J. I.; Koo, J.; Asseng, S.; Singels, A.; Moreno, L. P. and Jones, J. W. 2019. Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) Version 4.7.5 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA. 5-17 pp.
- IPCC. 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. IPCC. Ginebra, Suiza. 157 p.
- Jones, J. W.; Hanses, J. W.; Royce, F. S. and Messina, C. D. 2000. Potential benefits of climate forecasting to agriculture. *Agric. Ecosys. Environ.* 82(1-3):169-184. Doi:10.1016/S0167-8809(00)002255.
- Jones, J. W.; Hoogenboom, G.; Porter, C. H.; Boote, K. J.; Batchelor, W. D.; Hunt. L. A.; Wilkens, P. W.; Singh, U.; Gijsman, A. J. and Ritchie, J. T. 2003. DSSAT Cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18(3):235-265. doi:10.1016/S1161-0301(02)00107-7.

- Keating, B. A.; Carberry, P. S.; Hammer, G. L.; Probert, M. E.; Robertson, M. J.; Holzworth D.; Huth, N. I.; Hargreaves, J. N. G.; Meinke, H.; Hochman, Z.; Lean, G.; Verbug, K.; Snow, V.; Dimes, J. P.; Silburn, M.; Wang, E.; Brown, S.; Bristow, K. L.; Asseng, S.; Chapman, S.; Cown, R. L.; Freebairn, D. M. and Smith, C. J. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18(3-4):267-288. Doi:10.1016/S1161-0301(02)00108-9.
- López, A.; Pinto, J.; Ramírez, E. M. and Martínez, M. A. 2013. Modeling the potential impact of climatic change in northern Mexico using two environmental indicators. *Atmósfera.* 26(4):479-498. Doi:10.1016/S0187-6236(13)71090-7.
- Martínez, J. L. B. 2016. Modelos climáticos y su evaluación. *In: reporte mexicano de cambio climático. grupo I: bases científicas. Modelos y modelación.* Gay, C.; Cos, A. y Peña, C. T. (Ed.). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México. 205-217 pp.
- Mo'allim, A. A.; Rowshon, M. K.; Wayakok, A.; Ahsan, A.; Mohamed, A. and Mo'allim, A. 2016. Utilization of global circulations models for climatic change impacts assessment on agricultural water and crop production: a review. *Asian J. Appl. Sci.* 4(2):226-240.
- Moss, R. H.; Edmons, J. A.; Hibbard, K. A.; Manning, M. R.; Rose, S. K.; Vuuren, D. P.; Carter, T. R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G. A.; Mitchell, J. F. B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S. J.; Stouffer, R. J.; Thompson, A. M.; Weyant, J. O. and Wilbanks, T. J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature.* 463(7282):747-755. Doi:10.1038/nature08823.
- Murthy, V. R. K. 2004. Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology. *In: proceedings of the training workshop. Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology.* Sivakumar, M. V. K.; Roy, P. S.; Harmsen, K. and Saha, S. K. (Ed.). Dehra Dun. India. 235-261 pp.
- Rötter, R. P.; Appiah, M.; Fichtler, E.; Kersebaum, K. C.; Trnka, M. and Hoffman, M. P. 2018. Linking modelling and experimentation to better capture crop impacts of agroclimatic extremes-A review. *Field Crop Res.* 221:142-156. Doi: /10.1016/j.fcr.2018.02.023.
- Ruíz, J. A.; Medina, G.; Ramírez, J. L.; Flores, H. E.; Ramírez, G.; Manríquez, J. D.; Zarazúa, P.; González, D. R.; Díaz, G. y De la Mora, C. 2011a. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(2):309-323. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S200709342011000800011&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342011000800011&lng=es&tlng=es).
- Ruíz, J. A.; Medina, G.; Rodríguez, V. M.; Sánchez, D. J.; Villavicencio, R.; Durán, N.; Grajeda, J. y García, G. E. 2016. Regionalización del cambio climático en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7(13):2451-2464. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/agricolas/article/view/460>.
- Ruíz, J. A.; Ramírez, J. L.; Hernández, J. M.; Aragón, F.; Sánchez, J. D. J.; Ortega, A.; Medina, G. y Ramírez, G. 2011b. Razas mexicanas de maíz como fuente de germoplasma para la adaptación al cambio climático. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(2):365-379.
- SIAP. 2019. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Soltani, A. and Sincliar, T. R. 2012. Modeling physiology of crop development, growth and yield. CABI Publishing. MA, USA. 336 p. doi: 10.1079/9781845939700.0000.
- Teh, C. 2006. Introduction to mathematical modeling of crop growth. Brown Walker Press. Boca Raton, Florida, USA. 256 p.

- Van-Esse, G. W.; Harter, K. and De-Vries, S. C. 2013. Computational modelling of the BRI1 receptor system. *Plant, Cell Environ.* 36(9):1728-1737. Doi:10.1111/pce.12077.
- Van-Evert, F. K. and Campbell, G. S. 1994. Cropsyst: a collection of object-oriented simulation models of agricultural systems. *Agron. J.* 86(2):325-331. Doi:10.2134/agronj1994.00021962008600020022x.
- Velasco, I. and Celis, E. 2012. *Sequía y cambio climático en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Jiutepec, Morelos, México. 157 p.
- Venkateswarlu, B. and Singh, A. K. 2015. Climatic change adaptation and mitigation strategies in rainfed agriculture. In: *Climate change modelling, planning and policy for agriculture*. Singh, A. K.; Dagar, J. C.; Arunachalam, A.; Gopichandran, R. and Shelat, K. N. (Ed.). Springer. India: 1-12 p. doi:10.1007/978-81-322-2157-9-1.
- Wallach, D.; Makowski, D.; Jones J. W. and Brun, F. 2014. *Working with dynamic crop models. Methods, tools and examples for agriculture and environment*. Academic Press. 2<sup>nd</sup>. (Ed). San Diego, CA. USA. 484p. Doi:10.1016/B978-0-12-397008-4.00001-0.
- White, J. W.; Hoogenboom, G.; Kimball, B. A. and Wall, G. W. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Fuel and Energy Abstracts*. 124(3):357-368 doi:10.1016/j.fcr.2011.07.001.
- Williams, J. R.; Jones, C. A.; Kiniry, J. R. and Spanel, D. A. 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE*. 32(2):497-511. doi:10.13031/2013.31032.