

Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la mixteca, calculado con DSSAT

Maize (*Zea mays* L.) yields in southern Mexico calculated by the Decision Support System for Agrotechnology Transfer

Luis Enrique García-Montesinos^{1‡} , Demetrio Salvador Fernández-Reynoso¹ ,
Erasmus Rubio-Granados² , Mario Roberto Martínez-Menez^{1†}  y Leonardo Tijerina-Chávez¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[‡] Autor para correspondencia (enrique.g.montesinos@gmail.com)

² Consultor e Investigador de Conservación de Suelos y Manejo de Cuencas. Distribuidora y Dispensora de Recursos KANKI, S.P.R. DE R.L. Calle José Clemente Orozco #13, Colonia Emiliano Zapata. 56228 Texcoco, Estado de México, México.

RESUMEN

Los modelos de simulación, basados en procesos biofísicos, aplicados a la agricultura permiten conocer la dinámica de variables biológicas y ambientales, pero su uso implica grandes cantidades de información de suelo, clima, manejo y fenología de cultivos. En este estudio se calibraron y validaron, con el rendimiento del grano, los coeficientes genéticos del modelo CERES-Maize (Crop Environment Resource Synthesis) (DSSAT, versión 4.7) de plantas híbridas y criollas de maíz (*Zea mays* L.). El objetivo fue determinar el alcance y las limitaciones del modelo para estimar rendimientos de grano en la región Mixteca de Oaxaca, México. Para el proceso de calibración el ajuste para el maíz híbrido mostró $r^2 = 0.94$ y $RMSE = 567.11$ y para el criollo se obtuvo $r^2 = 0.86$ y $RMSE = 601.58$. En el proceso de validación correlación del maíz híbrido mostró $r^2 = 0.73$ y $RMSE = 976.65$, valores mayores que el cultivar criollo ($r^2 = 0.62$, $RMSE = 698.74$). El modelo CERES subestimó en promedio 10% del rendimiento del grano. Los cultivares híbridos mostraron un ajuste 10% mayor que los criollos. En general el modelo CERES-Maize estimó adecuadamente los rendimientos de maíz.

Palabras clave: CERES-maize, coeficientes genéticos, maíz criollo, simulación regional.

SUMMARY

Simulation models -based on biophysical processes- applied to agriculture allow knowing the dynamics of biological and environmental variables, but its use involves a large amount of soil information, climate, crop management and phenology. This study calibrated and validated, with grain yield, the genetic coefficients of the Crop Environment Resource Synthesis model (CERES-Maize) (DSSAT, version 4.7) of hybrid plants and corn creoles (*Zea mays* L.) The objective was to determine the scope and limitations of the model for estimating grain yields in the Mixteca (southern Mexico) region of Oaxaca, Mexico. For the calibration process, the setting for hybrid maize showed $r^2 = 0.94$ and $RMSE = 567.11$ and $r^2 = 0.86$ and $RMSE = 601.58$ for the Creole. The validation correlation process of hybrid maize showed $r^2 = 0.73$ and $RMSE = 976.65$, values greater than Creole cultivation ($r^2 = 0.62$, $RMSE = 698.74$). The CERES model underestimated in average 10% of grain yield. Hybrid cultivars showed 10% greater fit than Creole. In general, the CERES-Maize model adequately estimated maize yields.

Index words: CERES-maize, genetic coefficient, creole maize, regional simulation.

Cita recomendada:

García-Montesinos, L. E., D. S. Fernández-Reynoso, E. Rubio-Granados, M. R. Martínez-Menez[†] y L. Tijerina-Chávez. 2020. Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la mixteca, calculado con DSSAT. Terra Latinoamericana 38: 859-870.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.751>

Recibido: 24 de febrero de 2020.

Aceptado: 29 de mayo de 2020.

Publicado en Terra Latinoamericana 38: 859-870.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación aplicados a la agricultura han permitido conocer las interacciones entre sistemas biológicos y ambiente (Hernández *et al.*, 2009). Los modelos de simulación se han utilizado en diferentes disciplinas y los estudios resultantes en la investigación son diversos (Hoffman y Ewert, 2015). El uso de los diferentes tipos de modelos en la agricultura genera información sobre los sistemas que resulta útil en la toma de decisiones (Candelaria *et al.*, 2011) y sobre todo cuando los cultivos tienen importancia económica (Lv *et al.*, 2017). La modelación de cultivos regionales requiere de información abundante (Krishna, 2004); sin embargo, en Europa la limitación más importante para aplicar los modelos se relaciona con la disponibilidad de los datos de entrada de clima y fenología del cultivo (Motha *et al.*, 2011). Müller *et al.* (2017) evaluaron distintos modelos, cultivos y datos de referencia en escala global; los autores concluyeron que la simulación se complica por información inexistente de fisiología de cultivares y de algunas variables ambientales como radiación y tipos de suelo.

La aplicación de modelos a escala regional permite extrapolar resultados experimentales a lugares que no cuentan con información de respuesta (Basso *et al.*, 2013). Para solventar el problema de la falta de datos de clima, fenología y suelos, se puede recurrir a información climática y geográfica generada por instituciones de investigación y servicios de extensión agrícola (Liu *et al.*, 2003). Van Wart *et al.* (2013) aplicaron otras técnicas y métodos para inferir las condiciones climáticas prevalecientes, durante la etapa de desarrollo en una parcela, mediante mallas creadas a partir de polígonos de Thiessen. Grassini *et al.* (2015) y Van Wart *et al.* (2015) utilizaron generadores de series de tiempo para lluvia y temperatura, con pocos años de registro.

El DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) es una plataforma que incluye 42 modelos (Versión 4.7; <https://DSSAT.net>) y se ha aplicado con diferentes propósitos, desde el manejo del cultivo a nivel de parcela, la evaluación regional de la variabilidad climática, el análisis de riesgos, la planeación de la actividad agropecuaria, la transferencia de tecnología, entre otros Krishna (2004), Grassini *et al.* (2015), Hoffman y Ewert

(2015), (Hoogenboom *et al.*, 2017) y Lv *et al.* (2017) resaltan el potencial del DSSAT para estimar el crecimiento y rendimiento de cultivos bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo. DSSAT cuenta, con la ventaja de un requerimiento mínimo de información, específicamente el modelo CERES-Maize (Crop Environment Resource Synthesis), que parte de la plataforma DSSAT, se diseñó para simular el desarrollo fenológico, crecimiento y rendimiento del maíz, en condiciones de pocos datos de entrada de clima o suelo (Jones *et al.*, 2003).

En distintas zonas de Oaxaca el cultivo de maíz tiene importancia económica y cultural, en la región mixteca según Mindek (2003) la mayoría de sus pobladores se dedican a la agricultura, particularmente de maíz. En la región 94% de la agricultura es de secano (Berumen, 2004).

Los maíces criollos son los que dominan la producción de grano para autoconsumo y estos se caracterizan por su diversidad genética y morfológica. Rendón *et al.* (2015) identificaron en la sierra sur de Oaxaca 36 variedades tradicionales correspondientes a 10 razas agronómicas. El cultivo de maíz para producción de grano ocupa 80% de la superficie cosechada de la región y su rendimiento es de 0.8 a 1.3 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2015).

En México, para aplicar el modelo CERES-Maize, a nivel regional, se dispone de información de suelos, clima, manejo de cultivos, rendimientos de grano e información de fenología generada por diversas instancias. El objetivo de este trabajo fue calibrar los coeficientes genéticos del modelo CERES-Maize, para estimar los rendimientos de los maíces criollos e híbridos de la Mixteca Oaxaqueña y algunas áreas colindantes, utilizando la información disponible de clima, suelo, manejo del cultivo y rendimiento de grano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del Área de Estudio

La zona de estudio se localiza al poniente del estado de Oaxaca (Figura 1), a una altitud entre 1200 y 2300 m, la orografía es agreste y su clima va de semicálido seco a templado subhúmedo (Berumen, 2004).

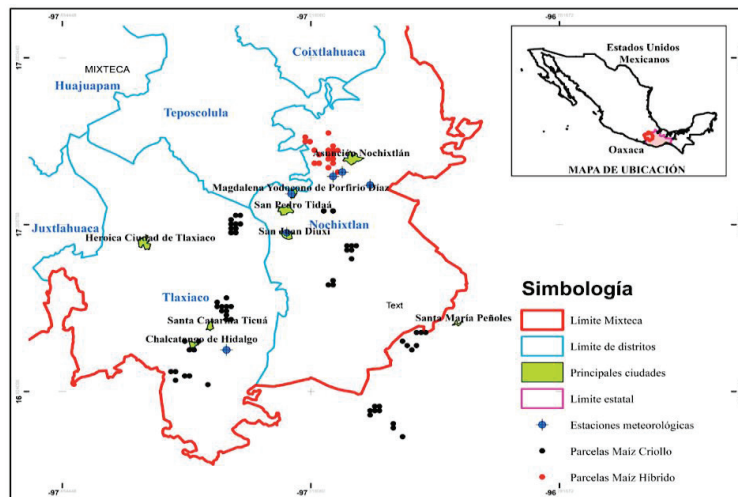


Figura 1. Localización de la zona de estudio (distritos de Nohixtlán, Tlaxiaco y Etlá, Oaxaca).

Figure 1. Location of the study area (Nohixtlán, Tlaxiaco and Etlá districts of Oaxaca).

Proceso de Calibración

De acuerdo con Pérez *et al.* (2006) la calibración es la estimación y ajuste de los parámetros de un modelo para mejorar la concordancia entre la información de salida (valores simulados) y un conjunto de datos de referencia (valores medidos). A cada parcela se le asignó la estación climatológica más cercana y el tipo de suelo correspondiente. En la calibración de CERES-Maize se utilizaron 26 parcelas para el cultivar híbrido y 32 para los maíces criollos. Cabe mencionar, que el número de parcelas utilizadas en la calibración fue menor a las usadas en la validación, esto se hizo con el objetivo de utilizar parcelas con las estaciones meteorológicas más cercanas y reducir la incertidumbre en los resultados, ya que los datos climáticos son base importante para la calibración del modelo (Grassini *et al.*, 2015).

Obtención de Datos Fenológicos y Cálculo de Coeficientes Genéticos

En este estudio los coeficientes genéticos (Cuadro 1) se calibraron con información de semillas Asgrow (Sierra *et al.*, 2004; Ángeles-Gaspar *et al.*, 2010) para maíces híbridos.

Para maíces criollos los coeficientes se generaron a partir del Catálogo de Maíces Nativos de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2006) y del estudio de complejos raciales

de poblaciones de maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca (Chávez *et al.*, 2011). Con base en estas fuentes se tomaron valores promedio de días a floración masculina y femenina, longitud y diámetro de la mazorca; hileras por mazorca y granos por hilera (Cuadro 2). A partir de las características fenológicas reportadas en la literatura, los coeficientes genéticos de referencia fueron modificados hasta lograr el mejor ajuste a los rendimientos reportados por el Programa de Mejoramiento a la Producción de Maíz y Frijol 2009-2011 (PROMAF).

Cuadro 1. Coeficientes genéticos para Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT).

Table 1. Genetic Coefficients for Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT).

	Descripción
P1	Tiempo térmico de emergencia a etapa juvenil.
P2	Días de retraso por cada hora de aumento al fotoperiodo.
P5	Tiempo térmico de floración a madurez fisiológica.
G2	Máximo número de granos por planta.
G3	Tasa de llenado en condiciones óptimas.
PHINT	Tiempo térmico entre aparición de hojas sucesivas.

Cuadro 2. Datos fenológicos para cultivares híbridos y criollos.
Table 2. Phenological data for hybrid and creole cultivars.

Parámetro	Híbrido	Criollo
Días a floración masculina	51	93
Días a floración femenina	55	99
Largo de la mazorca(cm)	13.7	16
Diámetro mazorca (cm)	4.1	4.43
Longitud del grano (cm)	1.16	No aplica
Hileras por mazorca	No aplica	12

Sierra *et al.* (2004); Aragón *et al.* (2006); Ángeles-Gaspar *et al.* (2010); Chávez *et al.* (2011).

Obtención de Datos de Manejo

La calibración y validación del CERES-Maize se efectuó con datos de parcelas del seguimiento técnico PROMAF de la SAGARPA. Las variables utilizadas fueron: fecha de siembra, fecha y cantidad de fertilizantes aplicados, régimen de humedad y rendimiento de cultivo. Para calibrar los parámetros del modelo se utilizó información de 58 parcelas dentro de la zona de estudio, 26 corresponden a híbridos y 32 a materiales criollos. Para validar los resultados se emplearon 126 parcelas, de ellas, 90 corresponden a criollos. Las parcelas utilizadas en la calibración no fueron las mismas que las utilizadas en la validación. Los datos generales de manejo incluidos en la calibración y validación muestran (Cuadros 3 y

4) la fecha de siembra, el arreglo topológico, densidad de plantación y regímenes de humedad utilizados en la simulación; el manejo es uniforme en las parcelas, la humedad y fecha de siembra son los factores que presentan mayor variabilidad.

Para las parcelas analizadas, en el Cuadro 4 se resumen las dosis y fechas de fertilización.

Obtención de Datos de Suelo

El tipo de suelo donde se ubicaron las parcelas fueron Feozem Lúvico, Regosol Eutrítico y Vertisol Mázico (INEGI, 2007). Para estos suelos se obtuvieron sus propiedades físicas y químicas medias provenientes de los perfiles que reporta la cartografía edafológica para la región.

Las propiedades físicas y químicas de los tres principales tipos de suelo empleados en la calibración y validación se presentan en el Cuadro 5.

Obtención de Datos Climatológicos

La información climática diaria se obtuvo de estaciones meteorológicas de SMN (2016) los datos faltantes (17.14% del total) se adquirieron de la base de datos climáticos que reporta el National Centers for Environmental Prediction (NCEP, 2016). Las variables climáticas utilizadas en el modelo fueron: radiación ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm). Las estaciones utilizadas para correr CERES-Maize se muestran en el Cuadro 6, con registros climatológicos entre 2009 y 2011, utilizados en la calibración y validación del

Cuadro 3. Datos promedio de manejo en las parcelas ubicadas en los distritos de Tlaxiaco, Nochixtlán y Etna, Oaxaca.
Table 3. Average management data in the plots located in districts of Tlaxiaco, Nochixtlán and Etna, Oaxaca.

Año	Tipo de semilla	Fecha de siembra (<i>Yrplt</i>)	Arreglo topológico (<i>Plds</i>)	Distancia entre surco, cm (<i>Rowspc</i>)	Densidad de plantación por m^2 (<i>Plants</i>)	Régimen de humedad (<i>Irrcod</i>)
2009	Híbrida	05/17/09 - 06/02/09	S [†]	80	6.67	R [‡]
	Criolla	06/08/09 - 06/31/09	S	80	7	T [§]
2010	Híbrida	06/01/10 - 07/01/10	S	80	7	T
	Criolla	06/03/10 - 06/15/10	S	80	7	T
2011	Híbrida	05/14/11 - 06/20/11	S	80	7	R
	Criolla	06/02/11 - 07/18/11	S	80	6.67	T

Yrplt, *Plds*, *Rowspc*, *Plants* e *irrcod* son nomenclaturas utilizadas en DSSAT. [†] surcos; [‡] riego; [§] temporal.

Yrplt, *Plds*, *Rowspc*, *Plants* and *irrcod* are nomenclatures used in DSSAT. [†] grooves; [‡] irrigation; [§] temporary.

Cuadro 4. Fechas y cantidad de fertilizantes aplicados en las parcelas ubicadas en los distritos de Tlaxiaco, Nochixtlán y Etlá, Oaxaca.
Table 4. Dates and amount of fertilizers applied to the plots located in the districts of Tlaxiaco, Nochixtlán and Etlá, Oaxaca.

Año	Semilla	Fecha de fertilización [†]			N [‡]	%F [§]			P	%F [¶]
		1	2	3		1	2	3		
2009	Híbrida	6/15/09 - 08/15/09	7/15/09 - 08/15/09	6/15/09 - 08/15/09	90±30	50	40	10	46±5	100
	Criolla	7/10/09 - 08/11/09	8/10/09 - 09/11/09		46±25	50	50		20±5	100
2010	Híbrida	7/05/10 - 08/06/10	8/02/10 - 09/03/10		90±10	50	50		30±5	100
	Criolla	7/05/10 - 08/04/10	8/07/10 - 09/03/10		40±25	50	50			
2011	Híbrida	6/14/11 - 08/16/11	7/14/11 - 09/12/11	6/14/11 - 08/16/11	80±15	50	30	20	46±5	100
	Criolla	7/03/11 - 08/02/11	8/02/11 - 09/11/11		46±10	50	50			

[†] mes/día/año; [‡] nitrógeno; [§] fósforo; [¶] fecha.

[†] month/day/year; [‡] nitrogen; [§] match; [¶] date.

CERES-Maize, así como el número de parcelas con maíces criollos e híbridos que fueron analizadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del Modelo

Durante la calibración de los cultivares híbridos y criollos se variaron los coeficientes genéticos a fin de reducir la diferencia global entre rendimientos de grano observados y simulados, minimizar la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y acercar el coeficiente de determinación (r^2) a uno.

Los valores que se tomaron como base para iniciar la calibración de estos coeficientes fue el cultivar FAO300 (Lizaso *et al.*, 2018) propuesto para zonas tropicales (Cuadro 7).

Validación del Modelo

La validación consistió en comparar los rendimientos simulados y observados, además de analizar la consistencia de los coeficientes genéticos calibrados, sin realizar modificaciones a estos, con el propósito de inferir que tan aceptables son para su uso general (Barrales *et al.*, 2004; Pérez *et al.*, 2006).

Cuadro 5. Datos de los tipos de suelos presentes en el área de estudio de la Mixteca (sureste de México).
Table 5. Data on the types of soils present in the Mixteca (southern Mexico) study area.

Parámetro (Nomenclatura usada en DSSAT)	Descripción	Feozem Lúvico			Regosol Eútrico		Vertisol Mázico			
<i>Scom</i>	Color	Café			Gris		Amarillento			
<i>Flsa</i>	Pendiente (%)	12			10		12			
<i>Swcon</i>	Potencial escurrimiento	Moderadamente bajo			Bajo		Moderadamente bajo			
<i>Zlyr(l)</i>	Profundidad del horizonte (cm)	30	60	90	20	17	47	77	107	132
<i>Silt(l)</i>	Limo (%)	28.3	27.2	32.7	31.5	20	12	18	14	18
<i>Clay(l)</i>	Arcilla (%)	16.8	52.2	42.7	40.7	14	20	30	32	41
<i>Oc(l)</i>	Carbón orgánico (%)	1.03	0.51	0.29	3.88	3.2	0.7	0.6	0.4	0.4
<i>pH(l)</i>	pH	6.5	6	6.1	7.7	6.5	5.8	6.1	6.3	6.3
<i>Cec(l)</i>	CIC (cmol kg ⁻¹)	7.5	15.5	13.5	29	18.8	10.5	9.9	10.3	17.6

Cuadro 6. Estaciones climatológicas empleadas para modelar, localizadas en la Mixteca Oaxaqueña (sureste de México).
Table 6. Weather stations used for modeling located in the Mixteca (southern Mexico).

Estación	Clave estación	Latitud	Longitud	Años empleados	Parcelas	
					Híbridos	Criollos
		- - - - - grados - - - - -				
Chalcatongo	CHN	17.02	-97.50	2009, 2010 y 2011	0	44
Nochixtlán	NXE	17.43	-97.25	2011	0	1
Nochixtlán	NXN	17.40	-97.19	2010	26	0
Etlatongo	ETL	17.42	-97.27	2009	10	0
Teojomulco	TEO	16.60	-97.20	2011	0	1
Tilantongo	TIL	17.29	-97.37	2010	0	10
Yodocono	YOD	17.38	-97.36	2009	0	14
Zaachila	ZAA	16.97	-96.82	2009	0	20

Calibración de Coeficientes Genéticos

En la Figura 2 se presenta la comparación entre rendimientos de grano simulados y medidos para cultivares híbridos y criollos de las parcelas utilizadas en la calibración. Para los cultivares criollos se observa que los datos se conforman en tres grupos y no de manera uniforme como ocurre con los cultivares híbridos. Esto se atribuye a las diferencias en la duración del ciclo del cultivo, así, las parcelas con rendimiento alrededor de 1000 kg ha⁻¹ presentan un ciclo menor de 120 días, las parcelas con rendimientos entre 2000 y 3000 kg ha⁻¹ tienen ciclos entre 165 y 175 días y las parcelas con rendimientos mayores a 3000 kg ha⁻¹ alcanzan ciclos

entre 170 y 200 días; esta diferencia de ciclos en los cultivares criollos de la región, están directamente relacionados con la variabilidad de la precipitación de los distintos municipios.

Los coeficientes genéticos resultantes de la calibración, para materiales híbridos y criollos, se usaron para correr el modelo con las parcelas restantes y así realizar el proceso de validación. Para las pruebas de bondad de ajuste del modelo en el proceso de calibración y validación se utilizaron los parámetros del análisis de regresión (b_1 y r^2), la raíz del cuadro medio del error (RMSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS) para los coeficientes genéticos, se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 7. Coeficientes genéticos calibrados para maíz híbrido y criollo.
Table 7. Calibrated genetic coefficients for hybrid and native corn.

Parámetro	Variedad FAO300	Rango (DSSAT)	Valores literatura †	Valores calibrados	
				Híbrido	Criollo
<i>P1</i>	215	110 - 458	175-260	220	185
<i>P2</i>	0	0 - 2	0 - 0.4	0.6	0.2
<i>P5</i>	800	390 - 720	630 - 680	550	585
<i>G2</i>	600	248 - 1170	255 - 936	890	480
<i>G3</i>	8	4.8 - 16.5	8 - 12	10.8	7.85
<i>PHINT</i>	42.60	35 - 75	40 - 54	42	38

† Coeficientes genéticos reportados por Rasse *et al.* (2000) y López *et al.* (2005).

† Genetic coefficients reported by Rasse *et al.* (2000) and López *et al.* (2005).

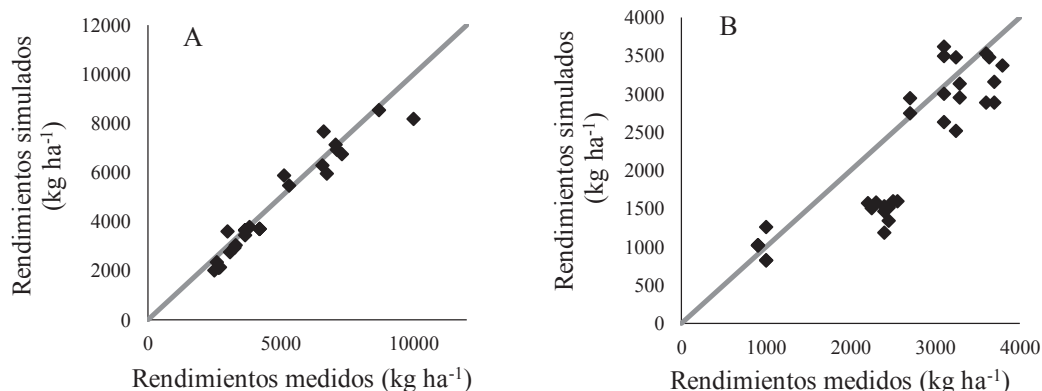


Figura 2. Comparación entre rendimientos de grano simulados y medidos: (A) Calibración de híbridos y (B) Calibración de maíces criollos.

Figure 2. Comparison between simulated and measured grain yields: (A) Calibration of hybrids and (B) Calibration of native maize.

Validación de Resultados

Así como en la calibración, en la validación se mantuvo la tendencia de los materiales criollos de presentar una mayor dispersión y una subestimación de los rendimientos de grano (por debajo de la línea de regresión) sobre todo en las parcelas con altos rendimientos (Figura 3).

Los valores calculados de r^2 para la calibración muestran que el modelo tuvo un ajuste bueno para ambos tipos de cultivares (0.94% para híbridos y 0.86% para criollos) (Cuadro 7). Durante la validación también se obtuvo un ajuste bueno para los cultivares híbridos, y un ajuste aceptable para los cultivares

Cuadro 8. Parámetros estadísticos resultado de la calibración y validación de los coeficientes genéticos para maíces híbridos y criollos.

Table 8. Statistical parameters resulting from the calibration and validation of the genetic coefficients for hybrid and native maize.

Cultivar	Regresión			RMSE	PBIAS
	b_0	b_1	r^2		
Híbrido (Calibración)	0	0.94	0.94	567.11	4.22
Criollo (Calibración)	0	0.91	0.86	601.58	14.15
Híbrido (Validación)	0	0.88	0.73	976.65	12.83
Criollo (Validación)	0	0.84	0.62	698.74	2.64

criollos (0.73 y 0.62 respectivamente). En la aplicación del modelo CERES-Maize, para la calibración de cultivares híbridos, los valores altos de r^2 coinciden con lo reportado por Nouna *et al.* (2000), Asadi y Clemente (2003) y Yang *et al.* (2006) quienes obtuvieron coeficientes de determinación de 0.96, 0.97 y 0.80-0.94% respectivamente. Por otro lado, los resultados de simulación de los maíces criollos mostraron menor ajuste, lo cual coincide con lo encontrado por Rasse *et al.* (2000) quienes, al comparar entre un maíz nativo y un híbrido, obtuvieron un r^2 de 0.50 y 0.83%, respectivamente. El bajo valor de los cultivares criollos se atribuye a que dentro de la misma variedad existe variabilidad, donde incluye genotipos de diferentes niveles de comportamiento.

La pendiente de las líneas de regresión, para los procesos de calibración y validación de materiales híbridos y criollos, al ser menor a 1.0 indica que el modelo tiende a subestimar los rendimientos; 8% en la calibración de híbridas, 16% en la calibración de criollas, 12% en la validación de híbridas y 19% en la validación de criollas. Esta subestimación concuerda con los estudios realizados por Asadi y Clemente (2003) quienes encontraron que CERES subestimaba rendimientos en la parcela control. Por otra parte, Chisanga *et al.* (2015) observaron en todos sus tratamientos que CERES subestimó los rendimientos entre un 8 y 19%. Raymond *et al.* (2009) encontraron que CERES-Maize subestimó ligeramente el rendimiento de maíz al obtener una pendiente de 0.98 en la recta de regresión.

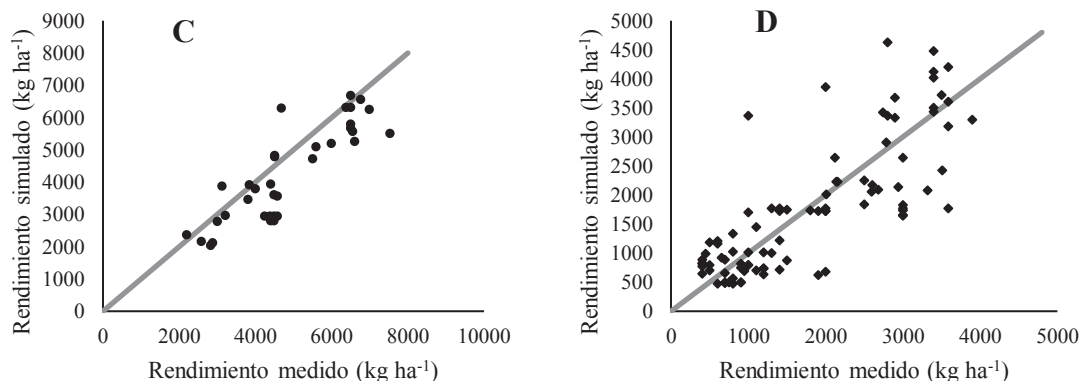


Figura 3. Comparación entre rendimientos de grano simulados y medidos: (C) validación de híbridos y (D) validación de maíces criollos.

Figure 3. Comparison between simulated and measured grain yields: (C) validation of hybrids and (D) validation of native maize.

El coeficiente de determinación (r^2) obtenido indica que los cultivares híbridos, tanto en la calibración como en la validación, tuvieron mejor correlación que los materiales criollos. Para los maíces híbridos, en la calibración los valores de RMSE presentaron menor diferencia que los criollos, sin embargo, en la validación ocurrió lo contrario, el RMSE fue mayor en los híbridos que, en los criollos, esto indica que los valores predichos tienen mayor error en comparación de los valores medidos. Por otra parte, los valores de positivos de PBIAS señalan la tendencia del modelo CERES-Maize a subestimar los rendimientos de grano.

El modelo presentó mejor ajuste en aquellas variedades con ciclos cortos, tal como se puede observar en la gráfica de calibración y validación de los cultivares híbridos, los cuales de acuerdo con Sierra *et al.* (2004); Aragón *et al.* (2006); Ángeles-Gaspar *et al.* (2010) y Chávez *et al.* (2011) tienen un ciclo más corto comparados con los maíces criollos, que alcanzan hasta 180 días.

Estrés por Humedad y Nitrógeno en el Rendimiento de Grano y Fenología del Cultivo

Con el propósito de analizar el potencial de CERES-Maize para evaluar la producción de maíz, en términos de la duración del ciclo de cultivo y los estreses por nitrógeno y humedad del suelo, se utilizaron los coeficientes genéticos calibrados para materiales híbridos, así como el manejo de cultivo, las condiciones climatológicas durante 2009 y las características del suelo (regosol eútrico) de la comunidad de Etlatongo.

En la Figura 4 se muestra a nivel diario la relación entre precipitación y los estreses por humedad y nitrógeno del suelo. Los estreses por agua y nitrógeno toman valores de cero a uno, correspondiendo a cero condiciones óptimas, sin estrés, y a uno condiciones de máximo estrés. Se puede observar que a partir del día 60 el estrés por nitrógeno aumenta conforme ocurre el crecimiento vegetativo, hasta alcanzar valores de 0.5 de deficiencia de nitrógeno; problema que persiste durante la floración y llenado de grano. Por otro lado, a partir del día 100, cuando son mayores las necesidades de agua por parte del cultivo, el estrés hídrico alcanza valores cercanos a 0.9, con altibajos en función del intervalo de lluvias y la magnitud de los eventos.

En la Figura 5a se compara la predicción de rendimiento de grano, correspondiente a las condiciones de manejo y climáticas de 2009 para la localidad de Etlatongo, con un escenario sin restricciones de humedad y otro escenario sin restricciones de humedad y nitrógeno. Para eliminar el estrés hídrico se simuló condiciones de riego automático y para reducir el estrés por nitrógeno se incrementó la dosis de fertilización a 120 kg ha^{-1} , la cual se dividió en 50% a la siembra y 50% a los 100 días de esta. Al eliminar el estrés, CERES-Maize reporta un incremento de rendimiento de grano por arriba de 4.0 Mg ha^{-1} y una reducción en el ciclo de cultivo en 22 días. Esto coincide con los resultados de Flores *et al.* (2013) quienes reportan, para parcelas sin estrés, incrementos de maíz en más de 5 Mg ha^{-1} .

En la Figura 5b se muestra la relación entre estrés hídrico y estrés por nitrógeno. La línea continua corresponde al estrés por nitrógeno en condiciones

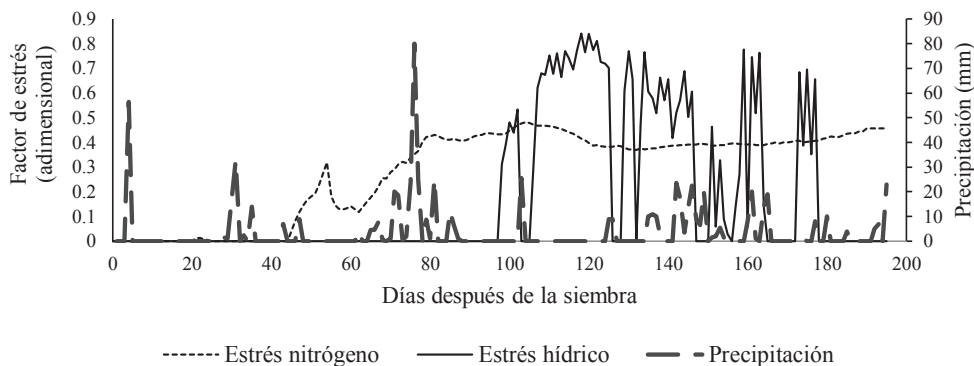


Figura 4. Estrés por nitrógenos y agua, durante 2009, para maíz híbrido de temporal en Etlatongo, Oaxaca.

Figure 4. Nitrogen and water stress, during 2009, for hybrid seasonal maize in Etlatongo, Oaxaca.

de temporal y la línea punteada al estrés de nitrógeno asumiendo riego automático. Se observa que la asimilación de nitrógeno se relaciona directamente con la disponibilidad de agua, ya que en condiciones de temporal el estrés por nitrógeno inicia a los 56 días de la siembra, en cambio, cuando se elimina el estrés hídrico (simulando riego automático) el estrés

por nitrógeno se hace evidente hasta los 130 días del ciclo. Esto se debe a que la absorción de nitrógeno por la planta está directamente relacionada con la densidad de las raíces y la humedad del suelo (Sau *et al.*, 2010), la cual participa en la solución y mineralización del nitrógeno presente en el suelo (Celaya y Castellanos, 2011).

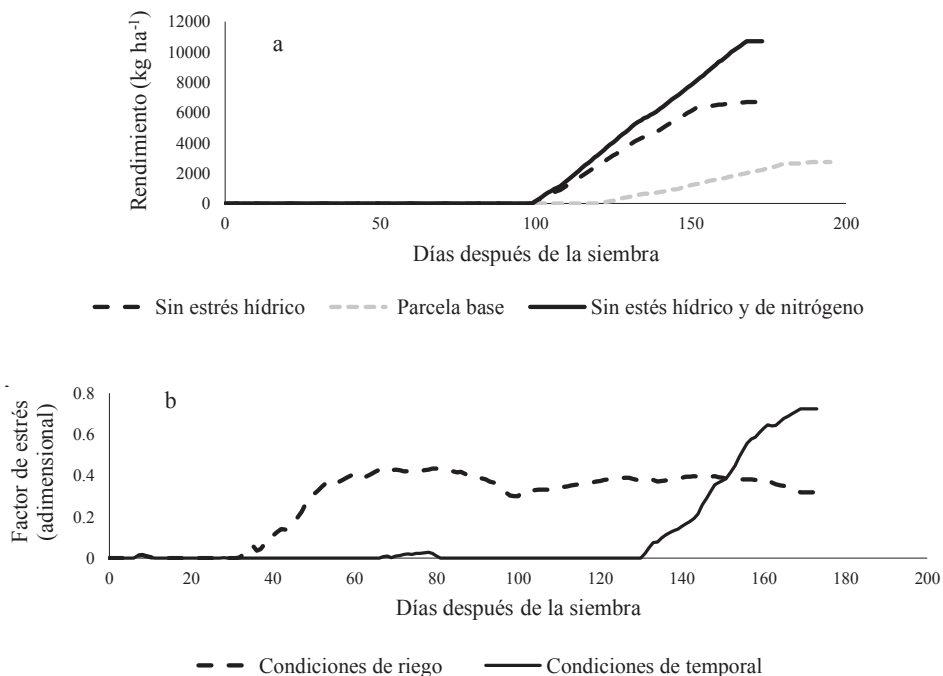


Figura 5. a) Rendimientos de grano con distintos niveles de estrés. b) Comportamiento del estrés de nitrógeno en condiciones de temporal y de riego automático.

Figure 5. a) Grain yields with different stress levels. b) Behavior of nitrogen stress in storm conditions and automatic irrigation.

En resumen, las parcelas con menor estrés por nitrógeno y agua tienden a incrementar el rendimiento de grano y a reducir el ciclo del cultivo de maíz. Sin embargo, en condiciones de temporal el aprovechamiento del nitrógeno queda supeditado al contenido de humedad del suelo. Estos resultados muestran el potencial del modelo CERES-Maize, una vez calibrados los coeficientes genéticos, para analizar los sistemas de producción de maíz en función de variables ambientales.

CONCLUSIONES

- Con la información disponible para la Región Mixteca fue posible calibrar y validar el modelo CERES-Maize (Crop Environment Resource Synthesis), lo que permite establecer diferencias entre variedades de acuerdo a su constitución genética, híbrido contra criollo, tomando en consideración la variabilidad intrínseca en estos últimos.
- El empleo del modelo puede ayudar a configurar los coeficientes genéticos del germoplasma requerido para las condiciones ambientales y con diferenciar más los genotipos por su ciclo de vida (precoz, tardío) y por sus etapas fenológicas.
- El modelo CERES-Maize tiende a subestimar 10% el rendimiento de grano, respecto al reportado.
- Los maíces criollos, debido a su amplia variabilidad genética, presentan menores ajustes que los materiales híbridos.
- El modelo CERES-Maize, una vez calibrados los coeficientes genéticos, es capaz de estimar el rendimiento de grano en función de variables ambientales y de estrés por agua y nitrógeno.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplica.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplica.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los datos generados o analizados durante este estudio se incluyen en este artículo publicado (y sus archivos de información complementaria).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia, en esta sección.

FONDOS

Todos los fondos ocupados para la realización de esta investigación fueron proporcionados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Enrique García Montesinos y Demetrio S. Fernández Reynoso. Metodología: Enrique García Montesinos y Demetrio S. Fernández Reynoso. Software: Enrique García Montesinos y Demetrio S. Fernández Reynoso. Validación: Enrique García Montesinos y Demetrio S. Fernández Reynoso. Análisis formal: Enrique García Montesinos, Demetrio S. Fernández Reynoso, Erasmo Rubio Granados, Leonardo Tijerina Chávez. Investigación: Enrique García Montesinos; recursos, Enrique García Montesinos y Demetrio S. Fernández Reynoso. Curación de datos: Enrique García Montesinos, Demetrio S. Fernández Reynoso, Erasmo Rubio Granados. Escritura, preparación del borrador original: Enrique García Montesinos. Escritura: Enrique García Montesinos, Demetrio S. Fernández Reynoso, Mario Martínez Menes, Leonardo Tijerina Chávez. Visualización: Enrique García Montesinos, Demetrio S. Fernández Reynoso, Mario Martínez Menes, Erasmo Rubio Granados. Supervisión: Demetrio S. Fernández Reynoso. Administración del proyecto: Enrique García Montesinos, Demetrio S. Fernández Reynoso. Adquisición de fondos: Demetrio S. Fernández Reynoso y Enrique García Montesinos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores y coautores deseamos expresar el agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado. También deseamos hacer una mención especial al Dr. Mario Martínez Menes por todo su apoyo e invaluable conocimiento brindado en este trabajo. Por último, pero no menos importante, agradecer al

Ph.D. Jon I. Lizaso, de la Universidad Politécnica de Madrid por su incansable apoyo en el manejo del Modelo CERES-Maize y de la plataforma DSSAT.

LITERATURA CITADA

- Ángeles-Gaspar, E., E. Ortiz-Torres, P. A. López y G. López-Romero. 2010. Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 287-296.
- Aragón C., F., S. Taba, J. M. Hernández Casillas, J. D. Figueroa Cárdenas, V. Serrano Altamirano y F. H. Castro García. 2006. Catálogo de maíces criollos de Oaxaca. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México.
- Asadi, M. and R. S. Clemente. 2003. Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield and soil moisture content under tropical conditions. *Food Agric. Environ.* 1: 270-276.
- Barrales Vega, L., I. Peña Rodríguez y P. Fernández de la Reguera. 2004. Validación de modelos: un enfoque aplicado. *Agric. Téc.* 64: 66 - 73. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072004000100008>.
- Basso, B., D. Cammarano, and E. Carfagna. 2013. Review of crop yield forecasting methods and early warning systems. pp. 1-56. *In: Proceedings of the First Meeting of the Scientific Advisory Committee of the Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics* FAO headquarters. Rome, Italy.
- Berumen Barbosa, M. 2004. Región Mixteca. Aspectos socio económicos y propuestas de acción para su crecimiento y desarrollo. EUMED.NET. Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- Candelaria M., B., O. Ruiz Rosado, F. Gallardo López, P. Pérez Hernández, A. Martínez Becerra y L. Vargas Villamil. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 14: 999-1010.
- Celaya Michel, H. y A. Castellanos Villegas. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana* 29: 343-356.
- Chávez Servia, J. L., P. Diego Flores y J. C. Carrillo Rodríguez. 2011. Complejos raciales de poblaciones de maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca. *Ra Ximhai* 7: 107-115. doi: <https://doi.org/10.35197/rx.07.01.2011.10.jc>.
- Chisanga, C., E. Phiri, C. Shepande, and H. Sichingabula. 2015. Evaluating CERES-Maize model using planting dates and nitrogen fertilizer in Zambia. *J. Agric. Sci.* 7: 79-97. doi: <https://doi.org/10.5539/jas.v7n3p79>.
- Flores Gallardo, H., W. Ojeda Bustamante, H. Flores Magdaleno, E. Sifuentes Ibarra y E. Mejía Saénz. 2013. Simulación del rendimiento de Maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrocencia* 47: 347-359.
- Grassini, P., L. van Bussel, J. van Wart, J. Wolf, L. Claessens, H. Yang, H. Boogaard, H. de Groot, M. van Ittersum, and K. Cassman. 2015. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crop Res.* 177: 49-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>.
- Hernández, N., F. Soto y A. Caballero. 2009. Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cult. Trop.* 30: 73-82.
- Hoogenboom, G., C. Porter, S. Vakhtrang, K. Boote, U. Singh, J. White, L. Hunt, R. Ogoshi, J. I. Lizaso, J. Koo, S. Asseng, A. Singels, L. Moreno, and J. Jones. 2017. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation. Gainesville, FL, USA.
- Hoffman, H. and F. Ewert. 2015. Evaluation of scaling methods for other crops, regions and scaling methods. *FACCE MACSUR Rep.* 7: 3-4.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2007. Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000 Serie II (Continuo Nacional). México. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (Consulta: marzo 14, 2019).
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18: 235-265. doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).
- Krishna Murthy, V. R. 2004. Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology. *W. Met. Org.* 1: 235-261.
- Liu, K., M. Goodman, S. Muse, J. S. Smith, E. Buckler, and J. Doebley. 2003. Genetic structure and diversity among maize inbred lines as inferred from DNA microsatellites. *Genetics* 165: 2117-2128.
- Lizaso Oñate, J. I., M. Ruíz Ramos, L. Rodríguez, C. Gabaldón, J. Oliveira, I. Lorite, D. Sánchez, E. García, and A. Rodríguez. 2018. Impact of high temperatures in maize: Phenology and yield components. *Field Crop Res.* 216: 129-140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.013>.
- López Cedrón, F. X., K. J. Boote, B. Ruíz Nogueira, and F. Sau. 2005. Testing CERES-Maize versions to estimate maize production in a cool environment. *Eur. J. Agron.* 23: 89-102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.01.001>.
- Lv, Z., X. Liu, W. Cao, and Y. Zhu. 2017. A model-based estimate of regional wheat yield gaps and water use efficiency in main winter wheat production regions of China. *Sci. Rep.* 7: 1-15. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06312-x>.
- Mindek, D. 2003. Mixtecos, pueblos indígenas del México contemporáneo. CDI, PNUD. México, D. F. ISBN: 970-753-011-1.
- Motha, R. P. 2011. Use of crop models for drought analysis. *Drought Mitigation Center Fac. Publ.* 58: 138-148.
- Müller, C., J. Elliott, J. Chryssanthacopoulos, A. Arneth, J. Balkovic, P. Ciais, D. Deryng, C. Folberth, M. Glotter, S. Hoek, T. Iizumi, R. Izaurralde, C. Jones, N. Khabarov, P. Lawrence, W. Liu, S. Olin, T. A. M. Pugh, D. K. Ray, A. Reddy, C. Rosenzweig, A. Ruane, G. Sakurai, E. Schmid, R. Skalsky, C. Song, X. Wang, A. de Wit, and H. Yang. 2017. Global gridded crop model evaluation: Benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geosci. Model Dev.* 10: 1403-1422. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1403-2017>.
- NCEP (National Centers for Environmental Prediction). 2016. Global weather data for SWAT. <https://globalweather.tamu.edu/>. (Consulta: febrero 17, 2019).

- Nouna, B., N. Katerji, and M. Mastrorilli. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. *Eur. J. Agron.* 13: 309-322. doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00063-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00063-0).
- Pérez-Maqueo, O., C. Delfín, A. Fregoso, H. Cotler Ávalos y M. Equihua. 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecol.* 78: 65-84.
- Rasse, D. P., J. T. Ritchie, W. Wilhelm, J. Wei, and E. C. Martin. 2000. Simulating inbred-maize yields with CERES-IM. *Agron. J.* 92: 672-678. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2000.924672x>.
- Raymond, F. D., W. E. Thomason, M. M. Alley, and D. J. Parrish. 2009. Reducing corn yield variability and enhancing yield through the use of corn-specific growth models. *J. Crop Improv.* 23: 467-485. doi: <https://doi.org/10.1080/15427520903129005>.
- Rendón Aguilar, B., V. Aguilar R., M. C. Aragón M., J. F. Ávila C., L. A. Bernal R., D. Bravo A., G. Carrillo G., A. Cornejo R., E. Delgadillo D., G. Hernández C., M. Hernández H., A. López A., J. M. Sánchez G., E. Vides B. y R. Ortega P. 2015. Diversidad de maíz en la sierra sur de Oaxaca, México: conocimiento y manejo tradicional. *Polibotánica* 39: 151-174.
- Sau, F., F. X. López C., A. E. Confalones y J. I. Lizaso. 2010. Modelos de simulación del cultivo de maíz: fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos* 40: 117-138.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria). 2015. Cierre de la producción agrícola por estado. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp (Consulta: abril 21, 2018).
- Sierra Macías, M., E. N. Becerra Leor, A. Palafox Caballero, S. Barrón Freyre, O. Cano Reyes, A. Zambada Martínez, A. Sandoval Rincón y J. Romero Mora 2004. Caracterización de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) con alta calidad de proteína por su rendimiento y tolerancia a pudrición de mazorca en el sureste de México. *Rev. Mex. Patol.* 22: 268-276.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2016. Red de estaciones climatológicas. *Climatología diaria*. México, D. F., México. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75. (Consulta: enero 12, 2018).
- Van Wart, J., P. Grassini, H. Yang, L. Claessens, A. Jarvis, and K. Cassman. 2015. Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. *Agric. For. Meteorol.* 209-210: 49-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.020>.
- Van Wart, J., P. Grassini, and K. Cassman. 2013. Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Global Change Biol.* 19: 3822-3834. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.12302>.
- Yang, Y., M. Watanabe, X. Zhang, X. Hao, and J. Zhang. 2006. Estimation of groundwater use by crop production simulated by DSSAT wheat and DSSAT maize models in the piedmont region of the North China Plain. *Hydrol. Processes* 20: 2787-2802. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.6071>.