



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.
Asociación de Usuarios de Riego y Drenaje

Artículo: COMEII-19023

Mazatlán, Sin., del 18 al 20

de septiembre de 2019

MODELO “SIMPLE” PARA SIMULACIÓN DE RENDIMIENTO DE MAÍZ EN EL ESTADO DE ZACATECAS, MÉXICO

Miguel Servin-Palestina^{1*}; Agustín Ruiz-García²; Irineo L. López-Cruz²

¹Estudiante de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Km. 38.5, carretera México-Texcoco. Chapingo, México; e INIFAP. Campo Experimental Zacatecas. Km. 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, 98500 Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México.

miguel.servin@hotmail.com (*Autor de correspondencia)

²Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Km. 38.5, carretera México-Texcoco. Chapingo, México.

Resumen

El maíz es de suma importancia económica, se clasifica como maíz blanco para consumo humano y maíz amarillo para la industria. La creciente demanda de alimentos y los recursos hídricos limitados exige ser más eficiente en el uso de agua especialmente en áreas áridas y semiáridas; debido a las condiciones climáticas cambiantes y múltiples incertidumbres existentes en los sistemas de producción agrícola, se han utilizado modelos dinámicos para estudiar los efectos de la variabilidad climática sobre los sistemas de producción agrícola. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue simular mediante el modelo SIMPLE la producción de maíz amarillo (35P12) y blanco (H-311) en Zacatecas, en cuatro diferentes condiciones de humedad en el suelo. Este modelo tiene 13 parámetros, de los cuales 9 corresponden a la especie y 4 a la variedad, estos últimos requieren ser estimados. Una vez que el modelo fue calibrado, se observó un ajuste aceptable para simulación de biomasa o materia seca (B) y rendimiento de grano (Y). Yobservados para 35P12 fluctuó de 14.22–18.68 t ha⁻¹ mientras que para H-311 fue 10.88–12.34 t ha⁻¹ y Ysimulados fue 13.97 - 19.99 t ha⁻¹ para 35P12 y 10.83 - 12.53 t ha⁻¹ para H-311, con valores de RRMSE 2.97% y 4.5% para la variedad 35P12 y 9.35%, 8.15% para H-311 para B y Y, respectivamente. El modelo SIMPLE es capaz de simular el rendimiento para maíz amarillo y blanco en las condiciones áridas y semiáridas presentes en Zacatecas bajo diferentes disponibilidades de agua.

Palabras claves: modelo dinámico, déficit de riego, índice de cosecha



Introducción

El maíz en México es de suma importancia económica, social y cultural, con un consumo promedio per cápita al año de 196.4 kg, la producción de maíz grano se divide en blanco y amarillo, el maíz blanco representa 86.94% de la producción y satisface la totalidad del consumo humano nacional, el maíz amarillo se destina para la industria y solo se satisface el 24 % (PAN, 2017). En Zacatecas se sembró en 2018 1,156 mil ha de las cuales 15.7%, 1.3% de maíz blanco y amarillo respectivamente, del total de la superficie del maíz únicamente el 13.4% fue de riego y aporta el 42% del valor de la producción, con rendimientos promedio de 6.54 t ha^{-1} superiores a los de temporal que es de 1.36 t ha^{-1} (SIAP, 2018). Aquí es donde el riego agrícola es vital y una herramienta crítica para garantizar la seguridad alimentaria. Geerts y Raes (2009) mencionan que el riego es la mejor opción para la producción de alimento, así mismo la agricultura de regadío proporciona el 40% de los alimentos del mundo y solo se utiliza en el 18% de las tierras cultivadas (FAO, 2015). Bajo la presión de la creciente demanda, escases del suministro y desperdicio en la agricultura tradicional de agua (Wang et al., 2017), la gestión sostenible del agua se está convirtiendo en un tema de gran importancia para los gestores del agua en todo el mundo (Elliott et al., 2014; Kang et al., 2017), lo que exige una mayor eficiencia en el uso del agua en la producción agrícola, especialmente en áreas áridas y semiáridas (Kosolapova et al., 2017). Debido a las múltiples incertidumbres existentes en los sistemas de producción bajo riego, se han utilizado varios modelos matemáticos (Tan et al., 2017; Xie et al., 2017). Un modelo matemático debe integrar todo el factor involucrados en la producción y preferentemente dinámicos para conocer el comportamiento temporal del cultivo. Los modelos dinámicos de sistemas agrícolas incorporan variables de entrada (climáticas), variables de estado (biomasa, índice de área foliar, cobertura) y parámetros del cultivo, nos muestran una representación y entendimiento de los procesos físicos y biológicos involucrados en el desarrollo de los cultivos y su interacción en el medio ambiente y manejo (James et al., 2016).

El maíz como cualquier otro cultivo es sensible al clima y disponibilidad de agua, el cambio climático, la distribución de las precipitaciones alteran la eficiencia del cultivo (Adams et al., 1998; FAO, 2012), por otro lado, los cambios en los patrones climáticos demandan el uso de herramientas computacionales y modelos de simulación para conocer la respuesta del cultivo con mayor certidumbre. Saseendran et al. (2015) mencionan que los modelos de simulación biológica de cultivos integran el conocimiento interdisciplinario obtenido a través de la experimentación y las innovaciones tecnológicas en los campos de las ciencias biológicas, físicas y químicas relacionadas con los sistemas de producción agrícola, además, el estrés hídrico es uno de los factores más importantes que afectan el rendimiento del maíz, especialmente durante los periodos de formación de espigas y llenado de granos, lo que resulta en una reducción significativa del rendimiento (Otegui et al., 1995). Varios estudios han reportado que los impactos de los déficits hídricos en el maíz varían según la etapa de crecimiento del desarrollo en la que se produce el estrés (Ghooshchi et al., 2008).

La respuesta de maíz al déficit hídrico es compleja por tal razón se han utilizado modelos de simulación para estimar los rendimientos. Los modelos de simulación biológica



pueden usarse para estimar la producción potencial e identificar factores limitantes de la producción o para analizar cambios en el manejo hídrico de los cultivos (López et al., 2005). Por otro lado, se han desarrollado varios modelos de cultivos de diferente complejidad, como Crop-Syst (Stöckle et al., 2003), EPIC (Cavero et al., 2000; Ko et al., 2009), DSSAT (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2017), que es el más utilizado ya que permite estimar el efecto del manejo y condiciones climáticas (Hoogenboom et al., 2012) del cual se derivaron los modelos APSIM (Keating et al., 2003) y Hybrid-Maize (Yang et al., 2004), WOFOST (Boogaard et al., 1998), STICS (Brisson et al., 1998) y AquaCrop (Raes et al., 2009). De acuerdo con Sandhu y Irmak (2019) y Heng et al. (2009) la mayoría de estos modelos son bastante sofisticados ya que requieren parámetros y variables de entrada sustanciales y pueden no ser siempre factibles o susceptible de uso general, es decir, se requieren muchos parámetros y estos parámetros son no a menudo fácilmente disponible (Hoogenboom et al., 2010; Jones et al., 2003). Recientemente Zhao et al. (2019) desarrollaron un modelo de cultivo genérico denominado SIMPLE que puede modificarse fácilmente para cualquier cultivo que simule su desarrollo y crecimiento con solo 13 parámetros. En este contexto el objetivo de este trabajo fue calibrar el modelo SIMPLE para estimar el rendimiento de maíz blanco y amarillo bajo diferentes niveles de humedad en dos diferentes etapas de desarrollo, con el fin de contar con herramientas que ayuden a la toma de decisiones. De acuerdo con Alba et al. (2007) es indispensable que México trabaje para optimizar el uso de los recursos disponibles y obtener mayores rendimientos en la producción de maíz.

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el Campo Experimental Zacatecas (CEZAC), ubicado a 22° 54' N y 102° 39' O y 2,197 msnm, temperatura media anual de 14.6 °C, ~ 600 unidades frío de noviembre a febrero, precipitación media anual de 416 mm, concentrada (75 %) en el verano (junio a septiembre) el resto durante el invierno y una evaporación media anual de 1,609 mm (Medina et al., 2004). El suelo es Kastanozem, textura franca arcillo-limosa, pH de 7.55, 2.9 % materia orgánica, densidad aparente de 1.4 g cm⁻³, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) obtenido mediante ollas de presión de 30.26 y 12.62 % respectivamente, para 0 a 30 cm y 31.11 y 14.59 % para 30 a 60 cm de profundidad de suelo.

Descripción del modelo

El modelo "SIMPLE" es un modelo semi-empírico desarrollado por Zhao et al. (2019), que simula el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en tiempo discreto a escala diaria, fue construido a partir de modelos existentes por varios grupos de investigación. Es un modelo genérico para diferentes especies de cultivos anuales en campo abierto, requiere nueve parámetros de acuerdo con la especie y cinco que caracterizan la variedad, y como variables de entrada la temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación solar. Las ecuaciones del modelo se describen a continuación.

Respuesta térmica de la tasa de desarrollo: El tiempo térmico (TT) definido como la sumatoria diaria acumulada del tiempo térmico diario (DTT) (Ecu. 1)

$$DTT = T_m - T_b ; T_m > T_b \quad (1)$$

donde T_m es la temperatura media diaria y T_b es la temperatura base del proceso (temperatura por debajo de la cual el desarrollo fenológico se detiene), que para el maíz se establece en 8 °C. Por otro lado, DTT, para un día determinado, es igual a cero si la temperatura máxima diaria (T_{max}) es menor que T_b , es decir no hay DTT diarias negativas (Ritchie et al., 1985), la temperatura requerida desde la siembra hasta la madurez fisiológica se denomina tiempo térmico acumulado (T_{sum}).

Crecimiento: El modelo SIMPLE basa la fotosíntesis en la eficiencia en el uso de la radiación (Monteith, 1965), la cual es la fracción de radiación interceptada por el dosel y transformada a biomasa (Ec. 2), y para obtener el producto comercial del cultivo utiliza el índice de cosecha (Ec. 3). El modelo considera factores ambientales diarios que afectan la acumulación de biomasa tales como temperatura, estrés por calor, estrés hídrico y concentración de CO_2 atmosférico (Figura 1)

$$B_{(t+1)} = B_t + \left((R_s \cdot f_{Solar} \cdot RUE \cdot f(CO_2) \cdot f(Temp)) \cdot \min \left\{ \begin{matrix} f(calor) \\ f(agua) \end{matrix} \right\} \right)_t \quad (2)$$

$$Y = B \cdot HI \quad (3)$$

dónde: $B_{(t+1)}$ es la tasa de acumulación de biomasa ($kg\ ha^{-1}$), R_s es la radiación solar ($MJ\ m^{-2}$), f_{Solar} es la fracción de R_s interceptada por el dosel del cultivo, RUE es la eficiencia en el uso de la radiación, $f(CO_2)$, $f(Temp)$, $f(calor)$ y $f(agua)$ es el impacto de CO_2 , temperatura, estrés por calor y agua en el crecimiento de biomasa respectivamente. f_{Solar} se basa en la ley de atenuación de la luz de Beer-Lambert (Ross, 2012) y la intercepción de radiación solar (Ecu 4).

$$f_{Solar}_{(t+1)} = \begin{cases} \frac{f_{Solar_max}}{1 + e^{-0.01 \cdot (TT - I_{50A})}} & ; \text{crecimiento de hojas} \\ \frac{f_{Solar_max}}{1 + e^{-0.01 \cdot (TT - (T_{sum} - I_{50B})}} & ; \text{senescencia de hojas} \end{cases} \quad (4)$$

dónde: I_{50A} es la temperatura acumulada requerida para el desarrollo del área foliar para interceptar el 50% de la radiación solar durante el cierre de la cubierta, e I_{50B} es la temperatura acumulada requerida desde la madurez hasta el 50% de la intercepción de radiación durante la senescencia de la cubierta. f_{Solar_max} es la fracción máxima de intercepción de radiación que puede alcanzar un cultivo. f_{Solar_max} se considera como un parámetro de gestión, no un parámetro de cultivo, para tener en cuenta las diferentes densidades de plantas. Para la mayoría de los cultivos de alta densidad, este valor se establece en 0.95.

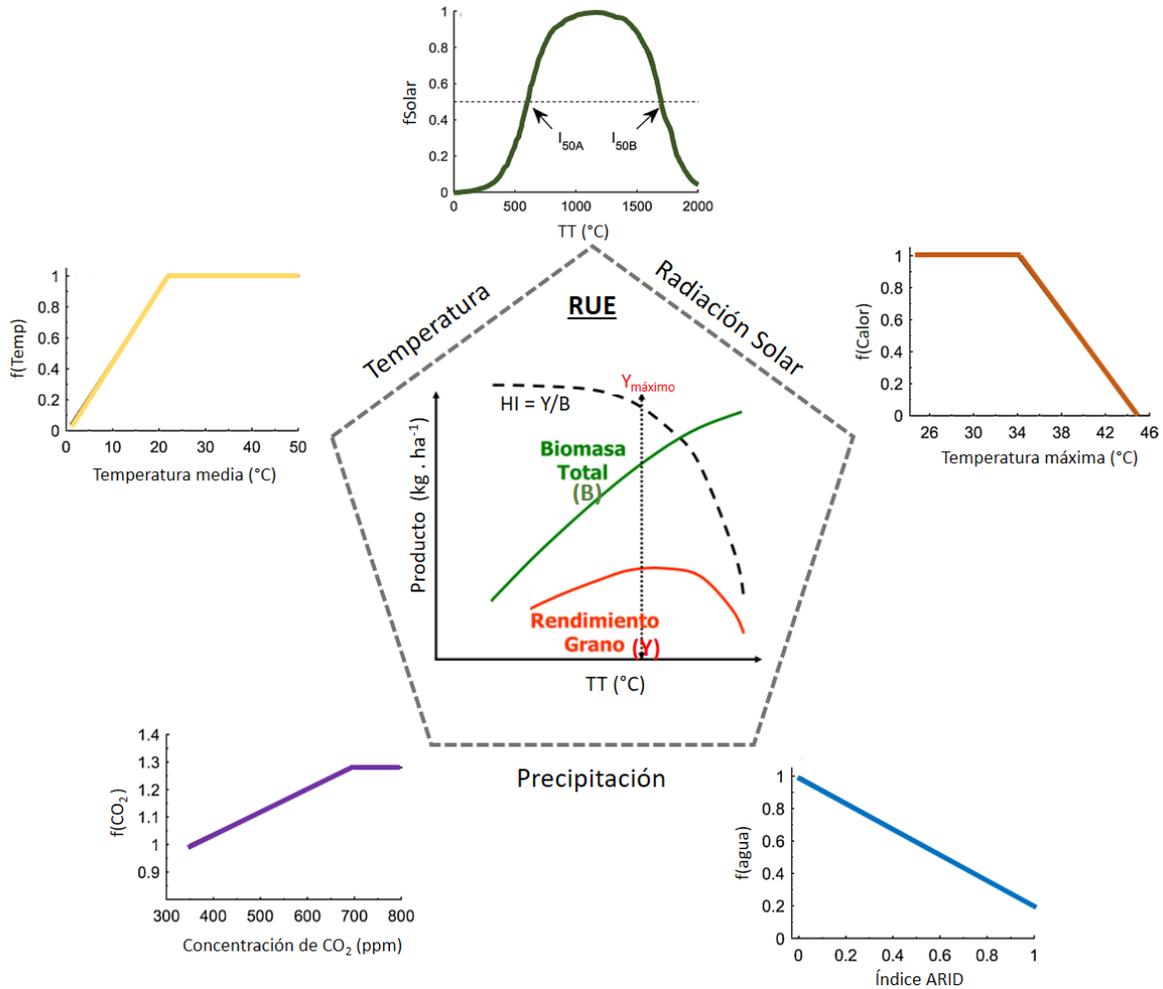


Figura 1. Diagrama conceptual de modelo SIMPLE (Adaptación propia de Zhao et al., 2019)

El impacto de la temperatura $f(\text{temp})$ en la tasa de crecimiento de biomasa está basada en la acumulación de grados días (Ritchie et al., 1985), el impacto del estrés por calor $f(\text{calor})$ en función de la temperatura máxima se basa en el modelo APSIM-Nwheat (Asseng et al., 2011), el efecto de $f(\text{CO}_2)$ en el crecimiento de biomasa se relaciona con la concentración de CO_2 del ambiente y es similar a estudios realizados por Bindi et al. (1996); Ewert et al. (2002) y Van Ittersum et al. (2003), el impacto por estrés de agua $f(\text{agua})$ se realizó en función del Índice de Referencia Agrícola para la Sequía (ARID) descrito por Woli et al. (2012), que se obtiene mediante un balance de agua en el suelo, utiliza la humedad residual en el suelo y la evapotranspiración de referencia (ETo) calculada por el método descrito por Priesley and Taylor (1972). El modelo SIMPLE se describe en Zhao et al. (2019). La simulación de rendimiento de maíz para este trabajo se realizó con el programa proporcionado por el autor codificado en R, en el ambiente de desarrollo RStudio v2.1 para Windows (RStudio, 2015). Para la simulación se usaron los parámetros y variables de entrada descritos en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros y variables de entrada para el cultivo de maíz variedad McCurdy 84 aa utilizados por el modelo SIMPLE.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades
Parámetros de la variedad (Zhao et al. (2019).			
T_{sum}	Temperatura acumulada requerida de siembra a madurez	2050	°C d*
HI	Índice de cosecha potencial	0.50	--
I_{50A}	Temperatura acumulada requerida para el desarrollo del área foliar para interceptar el 50% de la radiación	500	°C d
I_{50B}	Temperatura acumulativa hasta la madurez para alcanzar el 50% de intercepción de radiación debido a la senescencia de la hoja	50	°C d
Parámetros de la especie (Zhao et al. (2019).			
T_b	Temperatura base para el desarrollo y crecimiento de la fenología	8	°C
T_{opt}	Temperatura óptima para el crecimiento de la biomasa	28	°C
RUE	Eficiencia de uso de radiación (solo sobre el suelo y sin respiración)	2.1	G MJ ⁻¹ m ⁻²
I_{50maxH}	Reducción diaria máxima en I _{50B} debido al estrés por calor	100	°C d
I_{50maxW}	Reducción diaria máxima en I _{50B} debido al estrés por sequía	12	°C d
T_{max}	Temperatura umbral para comenzar a acelerar la senescencia del estrés por calor	34	°C
T_{ext}	Umbral de temperatura extrema cuando RUE se convierte en 0 debido al estrés por calor	50	°C
Sco₂	Aumento relativo de RUE por ppm de CO ₂ elevado por encima de 350 ppm.	0.01	Ppm
S_{water}	Sensibilidad de RUE (o índice de cosecha) al estrés por sequía (índice ARID)	1.2	--
Parámetros de suelo (franco-limoso) (Bennett et al., 1986)			
AWC	fracción de la capacidad de retención de agua disponible de la planta.	0.12	--
RCN	número de curva de escorrentía.	70	--
DDC	coeficiente de drenaje profundo.	0.3	--
RZD	profundidad de la zona de la raíz	400	mm
Variables de entrada (Bennett et al., 1986)			
Tmax	Temperatura máxima diaria	Gainesville, USA	°C
Tmin	Temperatura mínima diaria	Gainesville, USA	°C
Pp	Suma diaria de precipitación	Gainesville, USA	mm
Rs	Radiación solar diaria	Gainesville, USA	MJ m ⁻²
F_Siem	Fecha de siembra	82057	AADDD**
F_Cos	Fechas de cosecha	82193	AADDD
Bio_ini	Valor inicial de biomasa (Zhao et al. (2019).	1	Kg
TT_ini	Valor inicial de Tiempo Térmico (Zhao et al. (2019).	0	°C d
Fsolar_ini	Valor inicial de fracción de radiación solar interceptada (Zhao et al. (2019).	0.001	--

* °C d grados días de desarrollo **AADDD año y día juliano

Recopilación de datos

Datos climáticos

Los datos fueron obtenidos diariamente de una estación Adcon® ubicada a 800 m del experimento; la estación cuenta con sensores para medir la temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, dirección y velocidad del viento, radiación solar y humedad de la hoja, con tiempos de lectura (T_{Lec}) cada 15 minutos las 24 horas del día. Los datos utilizados para este trabajo fueron los datos promedio diarios de temperatura máxima (°C; Tmax), temperatura mínima (°C; Tmin), precipitación (mm; Pp) y radiación solar (MJ m⁻²; Rs). La radiación solar de la estación Adcon® está en W m⁻², para la transformarla a MJ m⁻² se realizó mediante la Ecu (5)

$$Rs \text{ (MJ m}^{-2}\text{)} = \frac{Rs \text{ (W m}^{-2}\text{)} * T_{Lec} \text{ (min)} * 60 \text{ (s min}^{-1}\text{)}}{1,000,000} \quad (5)$$



Rendimiento

El experimento se estableció el 19 de mayo del 2017 con la variedad H-311 (Blanco) y Pioneer 35P12 (Amarillo), usando una sembradora de precisión y densidad de siembra de 90,000 plantas por ha (siembra en húmedo), los tratamientos establecidos fueron cuatro niveles de tensión de agua en el suelo en combinación con su etapa de desarrollo. Etapa uno (E1) desde la siembra hasta inicio de floración y Etapa dos (E2) de la floración hasta madurez fisiológica. Dicha tensión se midió con sensores de humedad marca Watermark®, previamente calibrados para la zona de estudio, colocados a 30 cm de profundidad por duplicado para cada tratamiento. T1 = 5-15 y 5-15, T2=25-35 y 50-60, T3= 50-60 y 25-35 y T4=80-90 y 80-90 cbar de lectura del sensor para E1 y E2 respectivamente, el diseño experimental utilizado fue bloques al azar con 4 repeticiones. El riego se aplicó cuando alcanzó su límite máximo y se recupera la humedad hasta su límite más bajo para cada tratamiento. El agua se aplicó con un sistema de riego por goteo con cintilla calibre 6 mil con separación entre emisores de 20 cm y un gasto por emisor de 1.02 lph a una separación entre líneas regantes de 76 cm. En cada parcela experimental se instaló un medidor volumétrico de 1/2" de diámetro para corroborar el volumen aplicado, posteriormente se obtuvo el calendario de riego y la lámina aplicada total por tratamiento (R). La unidad experimental fue de 10 surcos de 0.76 m de ancho por 15 m de largo. La parcela útil fue de tres surcos centrales con 2 m de largo. La cosecha de las plantas se realizó manualmente a madurez fisiológica. Las variables evaluadas fueron: biomasa en términos de materia seca (B), rendimiento de grano (Y) y se calculó la eficiencia en el uso del agua (EUA), que es la relación del rendimiento de materia seca entre el volumen de agua aplicado y el índice de cosecha (HI) que es la relación entre el rendimiento de grano y la biomasa seca total.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza al rendimiento de grano de maíz (Y) y eficiencia en el uso de agua (EUA) utilizando el "PROC ANOVA", y la comparación de las medias de tratamientos fueron con la prueba de Tukey al 5% de probabilidad, mediante el paquete estadístico SAS (SAS, 2003).

Calibración del modelo

La calibración de los parámetros se realizó manualmente. Hussein et al. (2011) menciona que la calibración es el ajuste fino de ciertos parámetros del modelo para obtener una correlación alta entre los datos experimentales y los simulados. Posteriormente, para correlacionar los datos se utilizaron tres estadísticos, 1) Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) y Raíz cuadrada relativa del cuadrado medio del error (*RRMSE*) que es un indicador de incertidumbre y representa una medida global entre los valores observados y simulados, valores más cercano a cero son los ideales (Heng *et al.*, 2009), 2) Índice de concordancia de Willmott (*d*) de acuerdo con Willmott (1982) dicho valor varía de 0 a 1, y 3) Eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (*E*) que caracteriza el comportamiento del modelo de simulación, el modelo perfecto debería tener una eficiencia cercana a 1 (Krause et al., 2005); mediante las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} ; RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sum_{i=1}^n O_i} \cdot 100 \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

donde S_i y O_i son los valores simulados y observados respectivamente, n es el número de observaciones y \bar{O} es la media de los valores de O_i .

Resultados y Discusión

Rendimiento y eficiencia en el uso de agua

Para la variedad 35P12 el tratamiento que mostró el más alto rendimiento de grano fue T1 con 18.68 t ha^{-1} y fue estadísticamente igual a T2 y T3 ($P < 0.05$). Sin embargo, en la eficiencia del uso del agua el tratamiento T4 fue superior ($P < 0.05$) con valores de 5.2 kg m^{-3} , superiores al resto de los tratamientos ($P < 0.05$), aunque tuvo el rendimiento más bajo también se le aplicó menos agua de riego. De acuerdo con los datos mostrados se puede deducir que el rendimiento de grano de maíz variedad 35P12 tiene una respuesta no lineal a las diferentes láminas aplicadas (Cuadro 2). Los resultados fueron superiores a los reportados por Ojeda et al. (2006) para la variedad Pioneer 30G54 con rendimiento 10.7 t ha^{-1} en el ciclo O-I del año 2003-2004 en Sinaloa, México.

Cuadro 2. Datos experimentales del cultivo de maíz en Zacatecas México.

Trat	R (mm)	Variedad 35P12 (Amarillo)			Variedad H-311 (Blanco)		
		B (t ha^{-1})	Y (t ha^{-1})	EUA (kg m^{-3})	B (t ha^{-1})	Y (t ha^{-1})	EUA (kg m^{-3})
T1	709.1	37.95	18.68±1.1a	2.63±0.1c	23.51	12.34±1.3a	1.74±0.1b
T2	468.3	33.62	17.33±0.8a	3.7±0.1bc	22.06	10.88±1.8a	2.32±0.4b
T3	435.6	35.92	18.55±0.5a	4.25±0.1ab	24.43	11.77±2.2a	2.7±0.5b
T4	273.2	25.49	14.22±2.8b	5.2±1a	25.41	12.41±1.3a	4.54±0.5a
CV*			8.17	13.4		16.69	16.26
MSE**			1.4	0.53		1.98	0.46

R - lámina de riego aplicada; B - Biomasa seca total; Y- Rendimiento de grano; EUA - eficiencia en el uso de agua; *Coeficiente de variación ** Error de cuadrados medios. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente según Tukey al 5%.

Para la variedad H-311, el tratamiento que mostró el más alto rendimiento de grano fue T4 con 12.41 t ha^{-1} aunque fue estadísticamente igual al resto de los tratamientos ($P < 0.05$). Sin embargo, en la eficiencia del uso y productividad del agua también fue

superior ($P < 0.05$) con valores de 4.54 y 2.49 respectivamente. El tratamiento T4 fue superior al resto de los tratamientos ($P < 0.05$), ya que tuvo el rendimiento más alto y también se le aplicó menos agua de riego. De acuerdo con los datos mostrados se puede deducir que el rendimiento de grano de maíz variedad H-311 es superior a los reportados por Mojarro et al. (2012) de 10 t ha^{-1} bajo riego superficial y Bautista et al. (2013) de 9.4 t ha^{-1} en parcelas comerciales en Zacatecas. El índice de cosecha promedio (HI) fue de 0.52 y 0.5, el ciclo del cultivo fue de 157 y 165 días después de siembra (DDS), acumulando 1730 y 1760 grados días de desarrollo, para la variedad 35P12 y H-311, respectivamente.

Calibración del modelo

Los parámetros requeridos del modelo "SIMPLE" se aceptaron los reportados en la literatura (Cuadro 1) se estimaron los valores de T_{sum} y HI para ambas variedades y se calibraron manualmente los valores de RUE y S_{water} y I_{50A} (cuadro 3) hasta minimizar el RMSE de la biomasa y rendimiento final de grano simulado con respecto al observado, los parámetros de suelo se estimaron de acuerdo a los análisis de laboratorio y características físicas de la parcela experimental.

Cuadro 3. Parámetros y variables de entrada calibrados para maíz 35P12 y H-311 para el modelo "SIMPLE"

Parámetro	Valor (35P12)	Valor (H-311)	Unidades
Parámetros de la variedad			
T_{sum}	1730*	1760*	$^{\circ}\text{C d}^*$
HI	0.52*	0.5*	--
I_{50A}	400**	400**	$^{\circ}\text{C d}$
Parámetros de la especie			
RUE	3.35**	1.8**	$\text{G MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$
S_{water}	0.78**	0.36**	--
Parámetros de suelo (Franco arcilloso-limoso)*			
AWC	0.17	0.17	--
RCN	81	81	--
DDC	0.5	0.5	--
RZD	600	600	mm
Variables de entrada			
F_Siem	17139*	17139*	AADDD**
F_Cos	17296*	17304*	AADDD

*valores calculados con datos experimentales, ** valores calibrados manualmente hasta minimizar el RMSE de biomasa y grano simulado con respecto al observado

Biomasa y rendimiento de grano

La dinámica de biomasa simulada representa las condiciones hídricas de los 4 tratamientos y mostró un RRMSE de 2.97%, que representa 0.98 t ha^{-1} para 35P12 y 9.34% igual a 2.2 t ha^{-1} para H-311, que de acuerdo con Kottek et al. (2006) son valores excelentes ya que están por debajo del 10%, además, los tratamientos con estrés causaron una disminución en la intercepción de la radiación solar (f_{solar}) como se muestra en la figura 2, teniendo más efecto en la variedad 35P12.

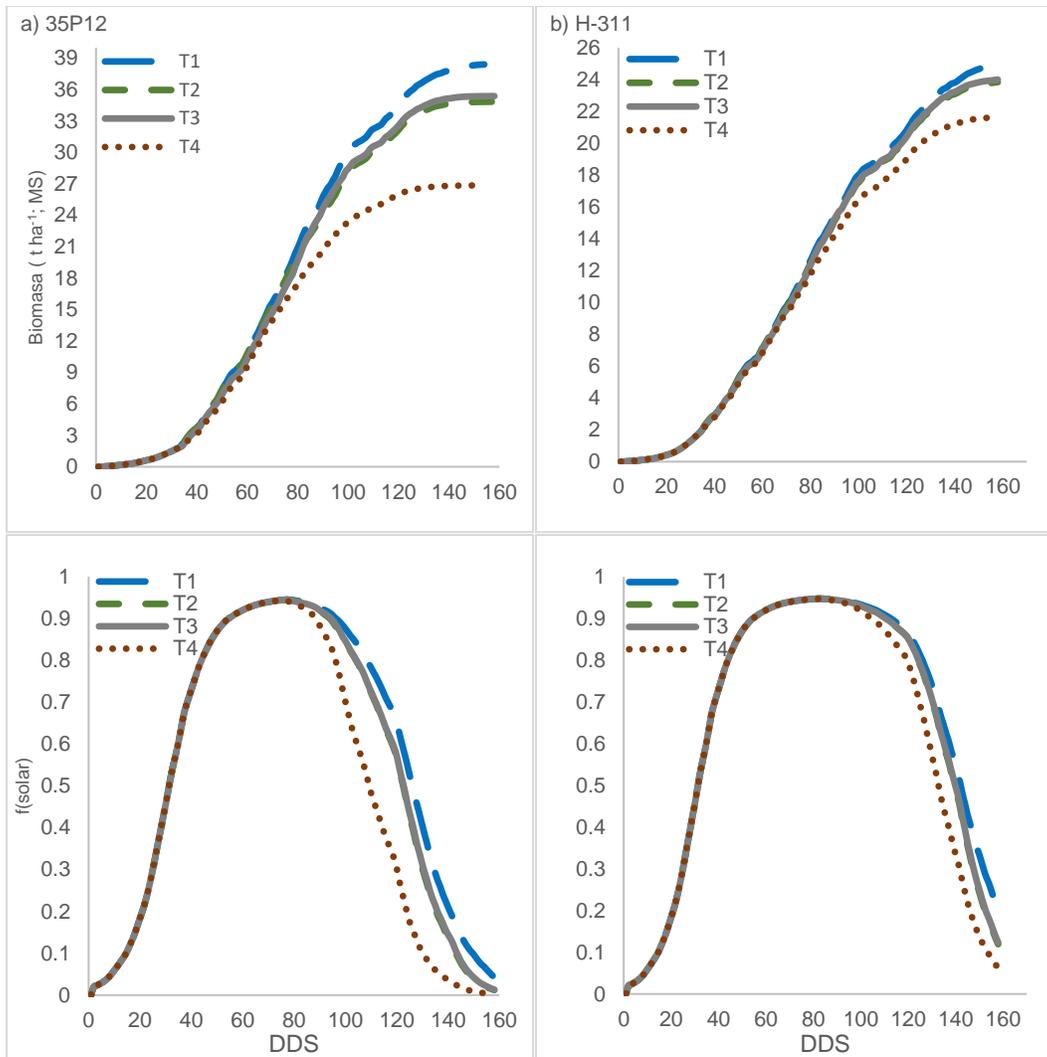


Figura 2. Biomasa acumulada y $f(\text{solar})$ en función de días de desarrollo para el cultivo de maíz variedad 35P12 (izquierda) y H-311 (derecha) en Zacatecas, México.

La simulación de rendimiento de grano mostró valores adecuados de acuerdo a los índices estadísticos, donde la variedad 35P12 obtuvo valores de 4.54% de RRMSE (Cuadro 4), es decir, tuvo mejor ajuste en la calibración para ambas variedades al igual que la biomasa presentó (Kottek et al., 2006).

Cuadro 4. Estadísticos de calibración de rendimiento de grano en maíz 35P12 y H-311

Tratamiento	Variedad 35P12 (Amarillo)		Variedad H-311 (Blanco)	
	Y (t ha ⁻¹) Observado	Y (t ha ⁻¹) Simulado	Y (t ha ⁻¹) Observado	Y (t ha ⁻¹) Simulado
T1	18.68	19.99	12.34	12.53
T2	17.33	18.12	10.88	11.95
T3	18.55	18.40	11.77	12.03
T4	14.22	13.97	12.41	10.83
RMSE*	0.78 t Ha ⁻¹ (4.54 %)		0.97 t Ha ⁻¹ (8.15 %)	
d**	0.907		0.193	
E***	0.811		-1.483	



Para el tratamiento T4 de la variedad H-311 presentó una amplia variación que afecta el ajuste de los datos simulados con respecto a los observados, que a pesar de que los valores de RMSE fueron aceptables, no así para d y E que muestran valores muy bajos y por debajo de cero que no son aceptables, lo que se le atribuye a la variación de rendimiento de T4 por lo que la calibración para H-311 en cultivos bajo estrés durante todo el ciclo crecimiento no es efectiva para los parámetros del cuadro 3.

Conclusiones

El modelo "SIMPLE" es capaz de simular el rendimiento de maíz con pocos parámetros, aunque se tiene que tener amplio cuidado con los parámetros RUE y S_{water} , el primero que considera la adaptación del cultivo a la zona para hacer más eficiente el uso de radiación y el segundo que tiene efecto en las condiciones hídricas en la que se desarrolla el cultivo. Para tener la certeza en el cambio de parámetros se requiere de un análisis de sensibilidad global y utilizar un método de optimización global para la estimación de los parámetros.

Referencias Bibliográficas

- Adams RM, Hurd BH, Lenhart S, Leary N (1998) Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. *Climate Research*, 11, 19-30.
- Alba T., E., R. Soria y M.T. Mata. Abril 2007. Perspectiva del uso de maíz para la producción de bioetanol. In *Claridades Agropecuarias*, (No.164) : 21- 29. ASERCA, México D.F. <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/164/ca164.pdf#page=21>
- Asseng, S., Foster, I., Turner, N.C., 2011. The impact of temperature variability on wheat yields. *Glob. Change Biol.* 17 (2), 997–1012.
- Bautista-Capetillo, C., Zavala, M., & Martínez-Cob, A. (2013). Using Thermal Units for Crop Coefficient Estimation and Irrigation Scheduling Improves Yield and Water Productivity of Corn (*Zea mays* L.). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(3), 214-220.
- Bennett, J., Jones, J., Zur, B., Hammond, L., 1986. Interactive effects of nitrogen and water stresses on water relations of field-grown corn leaves. *Agron. J.* 78 (2), 273–280.
- Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S., Miglietta, F., 1996. Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Clim. Res.* 7 (3), 213–224.
- Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rötter, R.P., Cabrera, J.M.C.A., Van Laar, H.H., 1998. User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5. Technical Document 52. Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands 144 pp.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate Ph Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Delecolle, R., 1998. STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomy* 18, 311–346.



- Cavero, J., Farré, I., Debaeke, P., Faci, J.M., 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92, 679–690.
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., ... & Eisner, S. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239-3244.
- Ewert, F., et al., 2002. Effects of elevated CO₂ and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93 (1-3), 249–266.
- FAO Statistical year book (2012) Europe and Central Asia. Food and agriculture. www.FAO.Org
- FAO, 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Aquastatwebsite. Rome, Italy: United Nations. www.fao.org/nr/water/aquastat/wateruse/index.stm.
- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management*, 96(9), 1275-1284.
- Ghooshchi, F., Seilsepour, M., Jafari, P., 2008. Effects of water stress on yield and some agronomic traits of maize SC 301. *Am. Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 4, 302–305.
- Heng, L. K., T. Hsiao, S. Evett, T. Howell, and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agron. J.* 101(3): 488-498.
- Heng, L. K., T. Hsiao, S. Evett, T. Howell, and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agron. J.* 101(3): 488-498.
- Hoogenboom, G., et al., 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, P. W. Wilkens, C. H. Porter, K. J. Boote, L. A. Hunt, U. Singh, J. L. Lizaso, J. W. White, O. Uryasev, F. S. Royce, R. Ogoshi, A. J. Gijsman, G. Y. Tsuji, and J. Koo. 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L.P., Jones, J.W., 2017. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
- Hussein, F., M. Janat, and A. Yakoub. 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish J. Agric. Res.* 9(4): 1319-1330.
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., . . . Janssen, S. (2016). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240-254.
- 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., Ritchie, J.T., 2003. DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265.
- Kang, S., Hao, X., Du, T., Tong, L., Su, X., Lu, H., ... & Ding, R. (2017). Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. *Agricultural Water Management*, 179, 5-17.
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K.



- Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebairn, and C. J. Smith. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18: 267-288.
- Ko, J., Piccinni, G., Steglich, E., 2009. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. *Agric. Water Manage.* 96, 1323–1331.
- Kosolapova, N.A., Matveeva, L.G., Nikitaeva, A.Y., Molapisi, L., 2017. Modeling resource basis for social and economic development strategies: water resource case. *J. Hydrol.* 553.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263.
- Krause, P., D. P. Boyle, and F. Bäse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5: 89-97.
- López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, y A. Rojano-Aguilar. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Rev. Chapingo Serie Hortíc.* 11(2): 257-267.
- Medina G, Ruíz A. Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Zacatecas (Período 1961 – 2003). SAGARPA-INIFAPCIRNOC- Campo Experimental Zacatecas. Libro Técnico No. 3; 2004: 40 p.
- Mojarro, D. F., Bautista-Capetillo, C., Ortiz, V. J., and Vázquez, F. E. (2012). “Comparing water performance by two different surface irrigation methods.” , Chapter 1, *Irrigation-water management, pollution and alternative strategies*, I. García-Garizabal and R. Abrahao, eds., InTech, Rijeka, Croatia, 1–21.
- Monteith, J.L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.* 29 (113), 17–37.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40(1): 13-25.
- Otegui, M.E., Andrade, F.H., Suero, E.E., 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res.* 40, 87–94.
- Plan Agrícola Nacional (2017), Maíz Grano Blanco y Amarillo Mexicano. Plan Nacional 2017-2030, SAGARPA CDMX, Mexico https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sico-Ma_z_Grano_Blanco_y_Amarillo.pdf (Consulta el 01-agosto-2019)
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100 (2), 81–92.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and soft ware description. *Agron. J.* 101, 438–447.
- Ritchie, J.T., Godwin, D.C., Otter-Nacke, S., 1985. CERES-wheat: A User-oriented Wheat Yield Model. Preliminary Documentation. AGRISTARS Publication No. YM-U3-04442-JSC-18892. Michigan State University, Michigan.
- Ross, J., 2012. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. 3. Springer Science & Business Media.
- RStudio Team (2015). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.



- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- SAS. User Guide. Statistical Analysis System. Inc. Cary, NC. versión 9.3. 2003.
- Saseendran, S. A., Ma, L., Nielsen, D. C., Vigil, M. F., & Ahuja, L. R. (2005). Simulating Planting Date Effects on Corn Production Using RZWQM and CERES-Maize Models. *Agronomy Journal*, 97(1), 58-71.
- Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP 2018). Anuario estadístico de la producción agrícola. 2018. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Consulta el 01-agosto-2019)
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst: a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289–307.
- Tan, Q., Zhang, S., Li, R., 2017. Optimal use of agricultural water and land resources through reconfiguring crop planting structure under socioeconomic and ecological objectives. *Water* 9, 488.
- Van Ittersum, M.K., Howden, S.M., Asseng, S., 2003. Sensitivity of productivity and deep drainage of wheat cropping systems in a Mediterranean environment to changes in CO₂, temperature and precipitation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 97 (1), 255–273.
- Wang, Y.B., Liu, D., Cao, X.C., Yang, Z.Y., Song, J.F., Chen, D.Y., Sun, S.K., 2017. Agricultural water rights trading and virtual water export compensation coupling model: a case study of an irrigation district in China. *Agric. Water Manage.* 180 (Pt. A), 99–106.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 63(11): 1309-1313.
- Woli, P., Jones, J., Ingram, K., Fraise, C., 2012. Agricultural reference index for drought (ARID). *Agron. J.* 104 (2), 287–300.
- Xie, Y.L., Xia, D.X., Ji, L., Huang, G.H., 2017. An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall. *Ecol. Indic.*
- Yang, H. S., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Walters, T. J. Arkebauer, and K. G. Cassman. 2004. Hybrid-Maize - a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Res.* 87: 131-154.
- Zhao Chuang, B. L., Liujun Xiao, Gerrit Hoogenboom, Kenneth J. Boote, Belay T. Kassie, Willingthon Pavan, . . . Yan Zhu, S. A. (2019). A SIMPLE crop model. *European Journal of Agronomy*, 104(1161-0301), 97-106.