

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL



<http://opn.to/a/1L7tp>

Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max* L) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico

Prediction of the soybean's yield using AquaCrop model in Ferralitic soils

Dr.C. Felicita González-Robaina*, Dr.C. Enrique Cisneros-Zayas, Dr.C. Julián Herrera-Puebla, Dr.C. Teresa López-Seijas, Dr. C. Greco Cid-Lazo

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. *AquaCrop* es un modelo de simulación diseñado para el análisis de la productividad de diferentes cultivos en respuesta al agua disponible. El objetivo del trabajo fue evaluar la capacidad predictiva del modelo bajo la condición de estrés hídrico y fertilidad en el cultivo de soya en suelo Ferralítico Rojo compactado. Para la corrida del modelo se utilizaron los datos obtenidos de experimentos de campo desarrollados en la estación experimental de "Pulido" en Alquízar. Entre los principales resultados se tiene que las predicciones del rendimiento de grano del modelo son aceptables, con un valor de $0,16 \text{ t ha}^{-1}$ para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*), la eficiencia de modelación superior a 0,76 e índice de Willmott (*d*) de 0,94. La simulación con estrés hídrico antes de la floración mostró que en el año húmedo el rendimiento fue superior en un 51% en comparación al seco, los valores de productividad para biomasa aérea, también son superiores. En el año seco la soya, bajo estrés hídrico antes de la floración, presentó entre los días 30 y 50 después de plantada el periodo más crítico, con 100% de inhibición de la expansión del crecimiento foliar. Se pudo comprobar además, que el nivel de fertilidad química del suelo ejerce un efecto significativo sobre la biomasa, el rendimiento y la productividad de la soya.

Palabras clave: simulación, estrés hídrico, fertilidad, Cuba.

ABSTRACT. *AquaCrop* is a simulation model designed to look at the productivity of different crops as a response to available water. The goal of the work was evaluate the model prediction capacity to simulate water and fertility stress for the soybean in Red Ferralitic soil. Data were collected from field trials carried out at the experiment station of the Irrigation and Drainage Research Institute in Alquízar, Artemisa province. One of the main results was that yield forecast of soybean as per the model were good, with a value of $0,16 \text{ t ha}^{-1}$ for the square root of the mean square of the error (*RMSE*), modelling efficiency higher than 0,76 Willmott index (*d*) of 0,94. Simulation under water stress conditions before flowering showed that yield in the rainy year was 51% higher compared to the dry period, reaching $2,25 \text{ t ha}^{-1}$, with productivity values for biomass and yield that were also higher. During the dry period, soybean submitted to water stress before flowering, showed the most critical period between 30 and 50 days after planting, with 100% inhibition of foliage growth. Soil fertility level had a significant effect on the biomass, yield and soybean productivity. A similar tendency is seen in these variables with reductions of 77%.

Keywords: simulation, water stress, fertility, Cuba.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la Soya (*Glycine max* L) se ha desarrollado en los últimos años en Cuba potenciado principalmente, por la limitación de alimentos para el consumo humano y para la

alimentación animal. La soya puede sembrarse en Cuba prácticamente durante todo el año, pero hay que tener en cuenta la variedad a seleccionar para cada ocasión (Merino, 2006).

*Autor para correspondencia: Felicita González Robaina, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

El estrés por agua o nutrientes afectan el crecimiento vegetativo y desarrollo de la soya al ser un cultivo muy sensible teniendo un mayor impacto al inicio de la formación de las vainas hasta el llenado completo de las semillas incidiendo grandemente sobre el rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1986).

La optimización del riego y la fertilización de cualquier cultivo agrícola implican el conocimiento de la dinámica del crecimiento y producción de las plantas bajo un rango amplio de suministro hídrico y de nutrientes que incluya la posible variación de estos en las distintas fases de desarrollo del cultivo. Esto se traduce en la concepción de numerosos experimentos de campo que abarquen el mayor rango posible de variantes, lo que evidentemente resulta costoso, consume mucho tiempo y los resultados obtenidos son válidos para un sitio y condiciones específicas. Es por tanto que en la actualidad los modelos dinámicos de simulación resultan herramientas indispensables en las investigaciones y el manejo agrícola (López *et al.*, 2009).

Los modelos en la agricultura se han usado según Candalaria *et al.* (2011), desde hace 50 años; inicialmente para evaluar procesos individuales, como evapotranspiración, propiedades hidráulicas del suelo, crecimiento de las plantas o cultivos y el contenido de nutrientes del suelo. En la actualidad aparecen modelos que bajo el enfoque de agroecosistemas integran los componentes del sistema de manera multi o interdisciplinaria, para evaluar impacto de la política agrícola sobre la degradación del suelo, impacto ambiental y rentabilidad económica de sistemas agrícolas alternativos, impacto de la economía y política regional sobre la agricultura.

En diferentes situaciones es más fácil trabajar con los modelos que con los sistemas reales, ya sea porque el sistema es demasiado grande y complejo, por limitación de recursos humanos y económicos, o por la imposibilidad de experimentar en dichos sistemas. Es por esto que en la investigación y planificación agrícola el desarrollo de modelos para simular diferentes procesos relacionados con su eficiencia, se ha convertido en una práctica común que, sustentada con la información científica disponible, es útil para pronosticar resultados en situaciones y condiciones específicas; lo que permite plantear nuevas hipótesis y orientar la investigación o el manejo hacia los puntos más críticos (Gormley y Sinclair, 2003).

Varios autores Jones *et al.* (2003); Peltzer y Peltzer (2013); Hoogenboom *et al.* (2015), han usados diferentes modelos (SIFESOJA, CropSyst, DSSAT) para simular fenología de soya, estimar la fecha de ocurrencia de los principales estados fenológicos reproductivos, evaluar la productividad, entre otros.

Según Heng *et al.* (2009), estos modelos sofisticados demandan habilidades para su calibración y operación porque requieren un número grande de parámetros, algunos específicos para los cultivos; esto complica su adopción por los agricultores o usuarios finales.

El modelo *AquaCrop* puede usarse como herramienta computacional para analizar escenarios agrícolas en ciclos y localidades diferentes (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Además ha sido desarrollado y orientado a cultivos anuales; separa por un lado la transpiración (vinculada a la productividad) de la evaporación del suelo, donde no

hay intercambio de carbono asimilable Steduto *et al.* (2007) y diferencia el rendimiento final en biomasa e índice de cosecha.

Este modelo determinístico está orientado a usuarios con conocimientos computacionales limitados, es simple sin perder exactitud, porque usa un número reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos comerciales (Raes *et al.*, 2009a), y se ha calibrado con buen ajuste y resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo.

En Cuba hay pocos trabajos publicados sobre este modelo, encontrándose los resultados de Tornés *et al.* (2016), quien se auxilió del modelo *AquaCrop* para evaluar las variables: coberturas foliar, biomasa seca aérea y contenido total de humedad del suelo para el diseño y manejo del riego por surcos en el cultivo del frijol en suelos Aluviales. Recientemente Díaz *et al.* (2018) y González *et al.* (2018), calibraron y validaron el modelo *AquaCrop* para maíz y sorgo, en suelo Ferralítico Rojo compactado en Alquízar, Artemisa. Los resultados de la calibración del modelo permitieron optimizar los parámetros fundamentales de suelo y cultivo para su aplicación en las condiciones de estudio.

El objetivo del trabajo fue evaluar la capacidad predictiva del modelo *AquaCrop* (versión 6.0) bajo la condición de estrés hídrico y fertilidad en el cultivo de soya en suelo Ferralítico Rojo compactado.

MÉTODOS

El modelo se calibró con datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (enero-abril 1983), en la Estación Experimental "Pulido", del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, en Alquízar, coordenadas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' W, altura sobre el nivel medio del mar 6 m, 12 km de la costa.

Con la finalidad de estudiar las necesidades hídricas y la respuesta al agua de la variedad de soya G-7 R-315 se llevaron a cabo experimentos por Castellanos (1986). La fecha de siembra fue el 6 de enero del 1983, la madurez se alcanzó a los 112 días después de la siembra, la densidad de población fue 370 370 plantas ha⁻¹ y el rendimiento máximo fue de 2,56 t ha⁻¹.

Se aplicaron cuatro tratamientos con diferentes criterios de riego (85 y 75 % de la humedad correspondiente a la capacidad de campo, 75% hasta la floración y el resto 85% y seco) en un diseño experimental en bloques al azar con cuatro réplicas y regado por aspersión. Una descripción más detallada de los procedimientos experimentales aparece en el trabajo publicado por Castellanos, (1986).

Los datos climáticos fueron tomados de la estación meteorológica localizada en el área experimental. Las variables climáticas se comportaron de la siguiente manera: la temperatura media mínima y máxima variaron entre los 8 y 31°C respectivamente, la lluvia total para los meses en estudio fue de 529 mm, año húmedo. El mayor valor de precipitación caída correspondió al mes de febrero con un total de 98,3 mm, mientras que el mes de menor promedio fue abril con una media de 42,4 mm mensual. La evapotranspiración de referencia (ET_o) tuvo un valor total para los meses en estudio de 497,3 mm. El promedio mensual es de 4,4 mm y los máximos y mínimos

corresponden a el mes de abril (6,8 mm) y enero (2,6 mm), respectivamente.

En la Figura 1 se muestra el balance hídrico decenal de precipitación y ETo para la zona y meses en estudio, donde se

refleja la variación de ambos parámetros. Este balance hídrico es negativo para 8 decenas (67 %) de un total de 12 existentes en el periodo de estudio, por lo que el riego es imprescindible para la obtención de buenos rendimientos agrícolas.

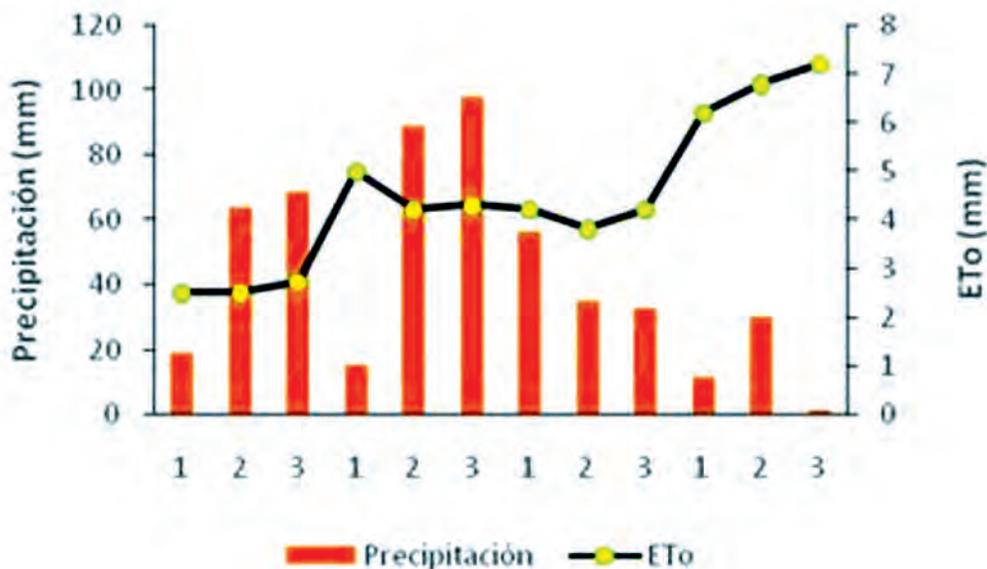


FIGURA 1. Balance hídrico decenal para los meses de enero -abril 1983.

Según Hernández et al. (2015), el tipo de suelo en estudio es Ferralítico Rojo compactado de la zona sur de La Habana, ampliamente estudiado y caracterizado los parámetros hidrofísicos por Cid et al. (2011). Para la conformación del fichero suelo, en todas las corridas del modelo, se empleó la información de González et al. (2018).

De acuerdo con López et al. (1998), este suelo pertenece al grupo A de los suelos cubanos por clases hidrológicas (cultivo en hileras, surcos rectos y condiciones hidrológicas malas, debido a la compactación del suelo), por lo que se adoptó la curva número (CN) 71 para representar el escurrimiento superficial y se consideró que no existe estancamiento de agua en superficie.

Como se debe especificar el contenido de agua de las capas del perfil del suelo al comienzo del período de simulación, si no es a la capacidad de campo, se consideró un contenido de agua en el suelo de $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, que representa el 90% del contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ($0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) hasta una profundidad de 0,40 m.

La calibración es un ajuste fino de ciertos parámetros del modelo para obtener correlación alta entre los valores experimentales y los simulados (Hussein et al., 2011). Después de realizar la calibración del modelo AquaCrop con el experimento de Castellanos (1986), la validación se hizo mediante análisis estadísticos de los datos de biomasa, rendimiento y cobertura del dosel, reales y los simulados con los parámetros de entrada.

La bondad del ajuste se valoró a través del coeficiente de determinación R^2 del ajuste lineal, la pendiente en 1:1, y los estadígrafos: raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), la eficiencia de modelación (EF) y el índice de Willmott (d), se calcularon según las expresiones propuestas por Araya et al. (2016):

De acuerdo con Heng et al. (2009), es factible el uso de estas expresiones, ya que: la **RMSE** representa una medida global entre los valores observados y simulados, es decir, un indicador de la incertidumbre, debido a que toma las mismas unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a cero indica un desempeño bueno en la simulación. **EF** tiene como valor máximo y óptimo 1. Si **EF** es menor que 0 el modelo predice peor que utilizando el valor medio de los datos observados. El valor d varía de 0 a 1 y en ambos análisis se aplicó secuencialmente a los datos observados y simulados.

Aplicaciones

Con el modelo calibrado y validado se realizaron corridas con los datos climáticos en los periodos enero-abril 1986 (año seco) y enero-abril 1999 (húmedo), categorías de años seleccionadas de una serie de 20 años (1985-2005) por Chaterlán (2012), para la probabilidad de ocurrencia del 25% año húmedo y del 90% año seco, para simular:

- producción potencial o máximo rendimiento posible sin ningún tipo de limitación salvo la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura.
- efecto del estrés hídrico antes de la floración.

El indicador de estrés es el **agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular (Dr)**, expresados como fracciones (p) del agua disponible total en el suelo (TAW). El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico: 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal, 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal y 3) cierre estomático. Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta, el modelo considera una curva que se activa al alcanzar límites establecidos para

la humedad del suelo y ajusta los umbrales de la curva según la ETo diaria, como medida de la demanda evaporativa de la atmósfera (Steduto *et al.*, 2012).

- efecto de la fertilidad del suelo en el rendimiento final de la soya.

Se optó por evaluar el efecto de diferentes niveles de fertilidad química (nutrientes minerales) del suelo para las condiciones de un año húmedo según valores que propone el modelo, evitando la mayor complejidad que supone analizar la interacción entre la disponibilidad de agua y la nutrición de los cultivos:

- cercano al óptimo (22% estrés por fertilidad)
- moderado (41% estrés por fertilidad)
- mitad (50% estrés por fertilidad)
- pobre (59% estrés por fertilidad)
- muy pobre (73% estrés por fertilidad)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el ajuste del modelo *AquaCrop* se realizaron simulaciones inicialmente sin modificar los parámetros conservativos

del cultivo y se compararon las salidas en cuanto a rendimiento respecto a la información de campo. A su vez, se evaluó estadísticamente el seguimiento de las variables agronómicas: biomasa seca, rendimiento del grano seco y cobertura vegetal, durante el ciclo de cultivo. De acuerdo a los resultados encontrados en el proceso de ajuste se han modificado algunos parámetros conservativos con relación a los que propone el modelo en su base de datos. En la Tabla 1 se presentan los parámetros conservativos más importantes usados en el modelo.

La cobertura del dosel vegetal al 90% de emergencia y el máximo crecimiento fueron 1,85 y 70%, respectivamente, y el coeficiente de decline del dosel por día fue estimado como 9,8%, valores que difieren de los originales calibrados en el modelo para la soya. Aquellos parámetros relacionados con la duración de las diferentes etapas de desarrollo del cultivo sufrieron también variaciones con respecto a los usados como valores de partida para comenzar la calibración; destacándose la cantidad de días después de plantada la soya para lograr la máxima cobertura, el comienzo de la floración y la senescencia 44, 45 y 98 días, respectivamente.

TABLA 1. Parámetros utilizados en la calibración de AquaCrop en soya para suelo Ferralítico Rojo compactado

Parámetro	Valor original	Valor usado
Densidad de plantación (plantas ha ⁻¹)	330 000	370 370
Cobertura inicial del dosel	0,98	0,70
Expansión del dosel (% día ⁻¹)	10,6	18,1
Declive del dosel (% día ⁻¹)	2,9	9,8
Emergencia (días después de plantación)	9	10
Máxima cobertura del dosel (días después de plantación)	72	44 días
Inicio de la senescencia (días después de plantación)	104	98
Longitud de florescencia (días después de plantación)	29	20
Madurez (días después de plantación)	130	112
Máxima profundidad efectiva radicular (m)	0,30	0,60
Máxima profundidad radicular (días después de plantación)	92	45
Máxima evapotranspiración del cultivo	1,02	1,1
Productividad del agua normalizada (g m ⁻²)	15	14
Índice de cosecha (HI) (%)	40	35
Función de expansión del dosel	Moderadamente tolerante	
Factor de agotamiento del agua en el suelo, Límite superior	0,15	0,15
Factor de agotamiento del agua en el suelo, Límite inferior	0,65	0,65
Forma	3,0	3,0
Función del cierre de los estomas	Moderadamente tolerante	
Factor de agotamiento del agua en el suelo, Límite superior	0,60	0,60
Forma	3,0	3,0
Función de la senescencia temprana del dosel	Moderadamente tolerante	
Factor de agotamiento del agua en el suelo, Límite superior	0,70	0,70
Forma	3,0	3,0
Efectos de la fertilidad	Considerado un 10%	
Efectos de la temperatura	No considerado	
Curva número	65	71
Rapidez de la evaporación del agua (capa de superficie de tierra evaporándose: 0,04 m)	9	10
Capa impermeable de suelo (m)	-	0,4

El índice de cosecha (HI) considerado fue de 0,35, por ser el valor más común obtenido bajo condiciones óptimas de desarrollo durante la calibración del modelo. Este valor se encuentra en el rango (0,3 y 0,5) que propone Wani *et al.* (2012).

El modelo tiene predeterminado el valor de la productividad del agua normalizada para soja de 15 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009). Para mejorar las predicciones del modelo fue necesario reducir este valor a 14 g m⁻². Los ajustes de *AquaCrop* normalizan la productividad del agua según la concentración de CO₂ atmosférico, año tras año.

Se comprobó que la productividad del agua normalizada para biomasa (WP*) es casi constante para un cultivo dado cuando los nutrientes minerales no son limitantes, independientemente del estrés hídrico. La reducción de la WP* es posible que sea a causa de deficiencias nutricionales, particularmente de nitrógeno (Steduto *et al.*, 2012).

Los parámetros calibrados del modelo *AquaCrop* fueron los de entrada del experimento de Castellanos (1986), cuando

se regó al 85% de la capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo (densidad de población, productividad del agua, longitud de florescencia, expansión inicial del dosel vegetal, profundidad efectiva radicular, emergencia, entre otros).

En la Tabla 2, se muestran los resultados de la calibración del modelo *AquaCrop* para soja en suelo ferralítico en Alquízar. Los valores de rendimiento y productividad están en el intervalo según trabajos precedentes de González *et al.* (2014). En el caso particular del rendimiento en experimentos de campo este varió entre 0,42 - 2,9 t ha⁻¹. Mientras que la productividad en base al rendimiento fue inferior al promedio obtenido por estos autores (0,67 kg m⁻³), lo que puede estar asociado a errores en el método simplificado de cálculo de los balances hídricos para la determinación de la ET utilizados en el experimento de campo consultado.

TABLA 2. Resultados de la corrida del modelo *AquaCrop* para la calibración en soja

	Producción (t ha ⁻¹)	Productividad del agua (kg m ⁻³)	Parámetros de balance de agua en el suelo (mm)	
Biomasa	7,6	1,59	Evaporación total	134,2
			Transpiración	342,4
Rendimiento	2,59	0,54	Escorrentía	163,6
			Infiltración	519,3
			Drenaje	39,4

Resultados similares a los encontrados en este trabajo fueron publicados por Boligon *et al.* (2017). Estos autores, para analizar el desempeño agronómico de la soja con un ciclo de 115 días en diferentes escenarios climáticos en Brasil, se apoyaron en el modelo *AquaCrop* para simular productividad del agua en base a la evapotranspiración e índice de cosecha, encontrando valores entre 0,58-0,60 kg m⁻³ y 31%, respectivamente.

Por otra parte, en un estudio sobre el impacto del estrés hídrico sobre el llenado de granos de la soja llevado a cabo en Manfredi, Argentina, Ergo (2013) obtuvo valores de productividad en base a la biomasa entre 1,2 -1,6 kg m⁻³. Los resultados expuestos en la Tabla 3.2 para las condiciones de Cuba se encuentran en este rango.

En la Figura 2 se presenta la salida del modelo *AquaCrop* para el cultivo de soja. No se aprecia reducción en el desarrollo de la biomasa potencial y el suelo estuvo a capacidad de campo en casi todo el ciclo de cultivo, no presentando estrés hídrico. Solo se aprecia un agotamiento de la humedad del suelo en la zona radicular (reducción en la expansión foliar en un 23%) entre el 12-14 de febrero, causado por la ausencia de lluvia y riego en cinco días consecutivos, no provocando reducción en el rendimiento final.

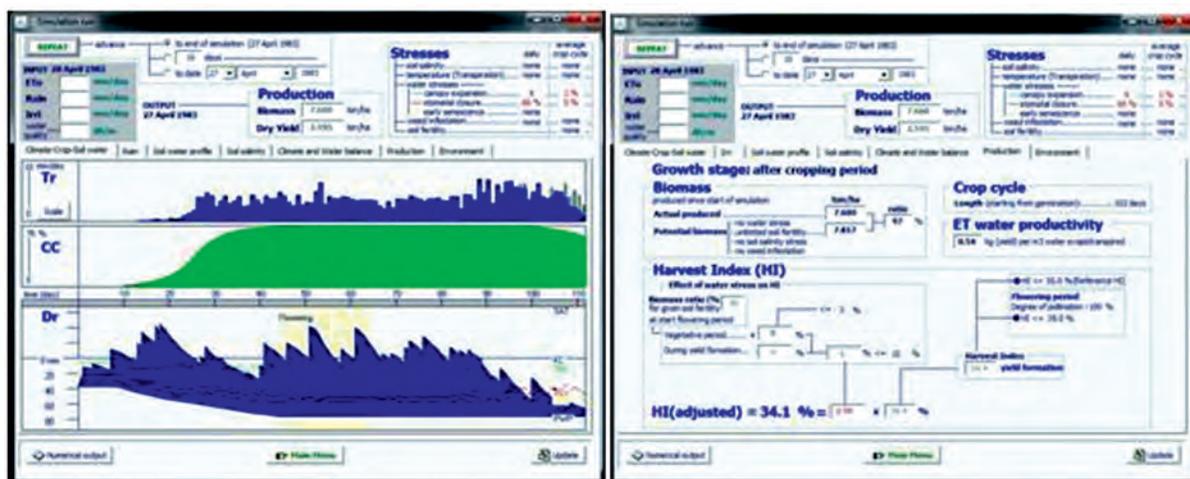


FIGURA 2. Salidas del modelo para soja.

La Figura 3 presenta el seguimiento de la biomasa medida y simulada con el modelo *AquaCrop*, para la variedad G-7R-315 del cultivo de soja, bajo las condiciones ambientales de Alquízar, en la siembra de enero-abril 1983, sin límites de agua y usando un nivel de fertilidad del suelo en el modelo de 100%. Se observa que los valores simulados de biomasa presentan concordancia en

relación con los datos medidos en campo, con incrementos diarios hasta el momento de la floración, donde cesa el crecimiento vegetativo e inicia el crecimiento reproductivo.

Además, se aprecia en las salidas del modelo alta afinidad, tanto en el rendimiento del grano como en la cobertura vegetal (CC), entre los valores medidos en campo y los simulados, presentándose armonía a lo largo de todo el ciclo del cultivo. Se encontró así que el valor del CC final, determinado con datos experimentalmente fue de un 67%, mientras que el simulado

fue de 70%, en todo el ciclo se sobrestimó la cobertura por el modelo, presentándose una diferencia de solo el 4%.

En la Figura 4 se muestra el seguimiento de la evaporación y transpiración a lo largo del ciclo del cultivo. Se observa una transpiración de 6,4 mm a los 54 días de plantada la soya, período de alto consumo por la planta, la floración. Mientras que, a los 91 días en plena formación de cosecha se alcanza un valor máximo de 7 mm, coincidiendo con los resultados de Merino (2006), que lo clasifica como periodo crítico para alcanzar altos rendimientos en la soya.

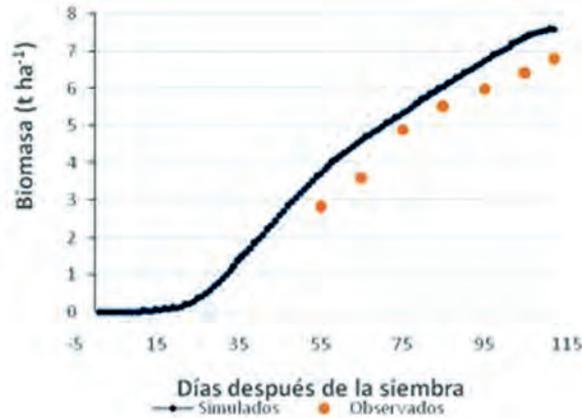


FIGURA 3. Seguimiento del comportamiento de biomasa medida en campo y simulada con AquaCrop en soya variedad G-7 R-315, bajo las condiciones de Alquízar.

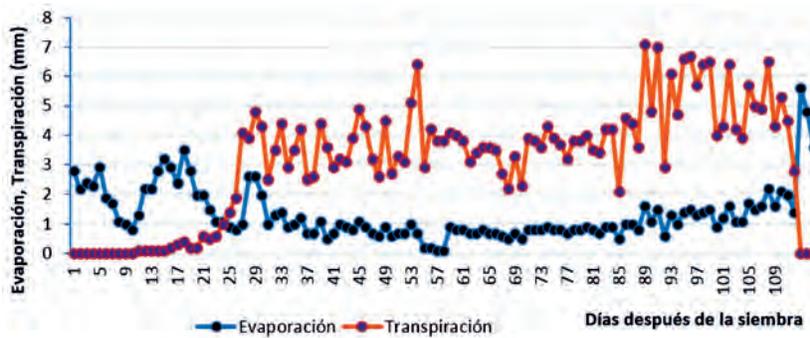


FIGURA 4. Seguimiento de la evaporación y la transpiración de la soya.

Según Ergo (2013), no todo el ciclo del cultivo resulta igualmente crítico, dicho período comienza en el inicio de la floración y finaliza 10 a 12 días después del llenado de granos, o puede prolongarse hasta el comienzo del máximo tamaño de las semillas, alrededor de los 90 días de plantada la soya, con valores de transpiración que pueden alcanzar los 8-9 mm día⁻¹.

Validación del modelo

Adicionalmente, el seguimiento de la biomasa simulada con el modelo y medida en campo (Figura 3), muestra valores para esta variedad de 7,6t ha⁻¹ y de 6,84 t ha⁻¹, respectivamente a los 112 días, presentando una diferencia de 750 kg ha⁻¹, lo que representa en términos porcentuales menos del 10%. Los resultados indican que las predicciones de la biomasa del modelo fueron buenas ($RMSE=0,79$ t ha⁻¹, $EF=0,88$ y $d=0,98$)

En la Tabla 3 se exponen los estadígrafos seleccionados en la validación del modelo en el cultivo de la soya para las

variables de salida: biomasa, rendimiento y cobertura vegetal.

La raíz cuadrada del cuadrado medio del error ($RMSE$) toma las mismas unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a cero indica un desempeño bueno en la simulación, lo que sucede para las tres variables de salida, con valores menores al 10%. La eficiencia está cercana a 1, que es el valor óptimo y d está en el rango establecido (entre 0 y 1).

TABLA 3. Estadígrafos seleccionados en la validación del modelo

Estadígrafo	Variables de salida		
	Biomasa	Rendimiento	Cobertura
RMSE	0,79	0,16	2,23
EF	0,88	0,83	0,76
d	0,98	0,95	0,94
r	0,99	0,99	0,95
pendiente	1,13	1,06	1,02
R ²	0,94	0,93	0,90

El anterior comportamiento se corrobora a través del coeficiente de determinación con valores de 0,94, 0,93 y 0,9, respectivamente, una relación fuertemente significativa (valores de probabilidad menores a 0,05) entre el seguimiento de las variables simuladas y las variables determinadas a nivel de campo. Resultados similares fueron obtenidos por Da Silva *et al.*, (2018) con *AquaCrop* en la región de Motopiba en Brasil.

Estos resultados demuestran que el modelo *AquaCrop* explica adecuadamente el desarrollo del crecimiento de la soya, evaluados bajo las condiciones ambientales y edáficas de suelo Ferralítico rojo en Alquízar.

Aplicaciones

Producción Potencial

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las simulaciones de producción potencial o máximo rendimiento posible de la soya para los periodos enero-abril 1986 (año seco) y enero-abril 1999 (húmedo). Se evidencia la posibilidad de alcanzar rendimientos de 3 t ha⁻¹ si el cultivo no se somete a ningún tipo de limitación y las precipitaciones son suficientes en este periodo poco lluvioso.

TABLA 4. Resultados de la corrida del modelo para producción potencial en soya para año seco y húmedo

Variable	Año seco	Año húmedo
Biomasa (t ha ⁻¹)	7,38	8,75
Rendimiento (t ha ⁻¹)	2,54	3,01
WP _{ET} (kg m ⁻³)	0,7	0,66
Lluvia (mm)	123,7	563,1
Riego (mm)	273	183,6
Evaporación (mm día ⁻¹)	1,4	1,1
Transpiración (mm día ⁻¹)	2,7	3,8
Evapotranspiración (mm)	379,3	465,3

En el año seco se aplicaron 12 riegos para garantizar la germinación y mantener durante todo el ciclo un nivel de disponibilidad de humedad en el suelo aceptable que permitiera lograr un rendimiento máximo, mientras que en el año húmedo fue necesario aplicar 8 riegos, pero con normas inferiores a 10 mm en cada aplicación y la mayoría en la etapa de germinación y desarrollo vegetativo. En el resto del ciclo las necesidades hídricas del cultivo fueron suplidas por las precipitaciones, que alcanzaron valores de 123,7 mm en el año seco y 563,1 mm en el húmedo.

Según Castellanos (1986), rendimientos por encima de las 3 t ha⁻¹, en las condiciones de suelo y clima similares al área de estudio, se pueden alcanzar solo en la siembra de primavera, y donde la productividad del agua en base a la evapotranspiración logra 0,88 kg m⁻³.

El modelo *AquaCrop* fue validado por Morla y Giayetto (2012) para la soya en la región de Río Cuarto, en el centro-sur de Córdoba, Argentina. Rendimientos de 1,9, 3,1 y 5,3 t ha⁻¹ fueron simulados para año seco, normal y húmedo, respectivamente. Considerando estos valores potenciales de producción como referentes de la capacidad productiva de los ambientes de esta región.

Rendimientos entre 4 y 4,6 t ha⁻¹ fueron simulados por *AquaCrop* para la región norte de Gana, en un estudio sobre la influencia del clima en suelo arcilloso profundo desarrollado por Denka (2014) para generar fechas de siembra óptimas.

En la Figura 5 se presenta la salida del modelo *AquaCrop* para producción potencial en el cultivo de soya en el año seco. No se aprecia reducción en el desarrollo de la cobertura del dosel y el suelo estuvo cercano a capacidad de campo en casi todo el ciclo de cultivo, por lo que no se observa disminución del crecimiento foliar, conductancia estomática y senescencia temprana, no presentando estrés hídrico.

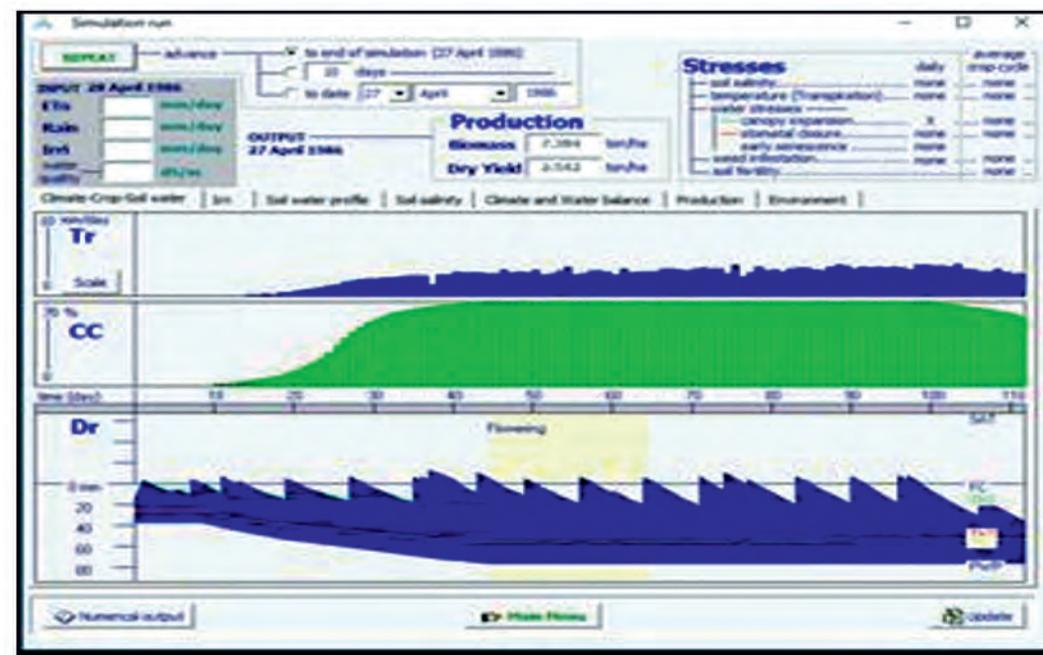


FIGURA 5. Salidas del modelo para producción potencial de la soya en año seco.

Efecto del estrés hídrico antes de la floración

En la Tabla 5 se muestran las salidas obtenidas para la simulación de la producción de biomasa, rendimiento, productividad del agua y algunos parámetros de balance de agua en el suelo del cultivo de la soya bajo efecto de estrés hídrico antes de la floración para los dos periodos estudiados.

TABLA 5. Salidas del modelo para la simulación del cultivo de la soya con estrés hídrico antes de la floración para los dos años seleccionados

Variable	Año seco	Año húmedo
Biomasa (t ha ⁻¹)	3,84	6,5
Rendimiento (t ha ⁻¹)	1,18	2,25
WP _{ET} (kg m ⁻³)	0,31	0,59
WP _B (kg m ⁻³)	1,01	1,71
Lluvia (mm)	123,7	563,1
Riego (mm)	99	48
Evaporación (mm día ⁻¹)	1,6	1,6
Transpiración (mm día ⁻¹)	0,7	2,7
Evapotranspiración (mm)	379,3	465,3

Se aplicaron 4 riegos en el año seco y 2 en el húmedo para garantizar la germinación. En el resto del ciclo las necesidades hídricas del cultivo fueron suplidas por las precipitaciones. En el año húmedo el rendimiento fue superior en un 51% en comparación al seco, obteniéndose resultados de 2,25 t ha⁻¹, con valores de productividad para biomasa y rendimiento también superiores debido a que las aplicaciones de riego fueron mínimas. Como promedio en todo el periodo estudiado del año húmedo, la soya presentó índice de estrés de un 6 y 21%, respectivamente, en el cierre de los estomas y en la expansión del crecimiento foliar; no afectándose el rendimiento final por el aporte significativo de las precipitaciones en el resto del ciclo del cultivo.

Comparando estos resultados con los obtenidos en la simulación sin estrés hídrico, el rendimiento en el año húmedo disminuyó en 0,76 t ha⁻¹, mientras que para el año seco fue más importante esta reducción, alcanzando 1,5 t ha⁻¹. Confirmando lo planteado por González (2013) de que cultivos como la soya, tradicionalmente cultivados en secano o considerados de poca demanda de riego, se obtienen incrementos de rendimiento superiores al 100% cuando se aplica el agua necesaria para satisfacer su demanda hídrica.

La lámina de riego total aplicada durante este periodo fue de 99 mm. Como se muestra en la Figura 6, un estrés hídrico muy leve, que se prolongue por muchos días, puede redundar en una cobertura del dosel mucho menor durante la etapa vegetativa. En el año seco la soya presentó, entre los días 30 y 50 después de plantada, el periodo más crítico, con 100% de inhibición de la expansión del crecimiento foliar. Mientras que entre el 6 de marzo y el 5 de abril (60-90 días de plantada) el cultivo sufrió, en plena etapa de floración y llenado del grano, niveles de estrés hídrico del orden del 100% de inhibición de la expansión del crecimiento foliar, un 52% de cierre estomático y 9% de senescencia temprana, lo que provocó una disminución en el índice de cosecha a 30,9%.

Steduto *et al.* (2012 y Ergo (2013) no recomiendan estrés hídrico durante la floración y llenado del grano, debido a que provoca directamente la reducción de la tasa de producción de biomasa, y por tanto muy bajos o incluso puede llegar a cero rendimiento.

La transpiración se redujo de 2,7 a 0,7 mm día⁻¹, provocando reducción del rendimiento en un 55%. Desde el punto de vista del número de riegos y las normas totales esta reducción estuvo en un 67 y 64%, respectivamente (12 riegos a 4, de 273 mm a 99 mm). A partir de los 80 días la cantidad de agua aportada por la lluvia y su distribución permitieron una recuperación del cultivo.

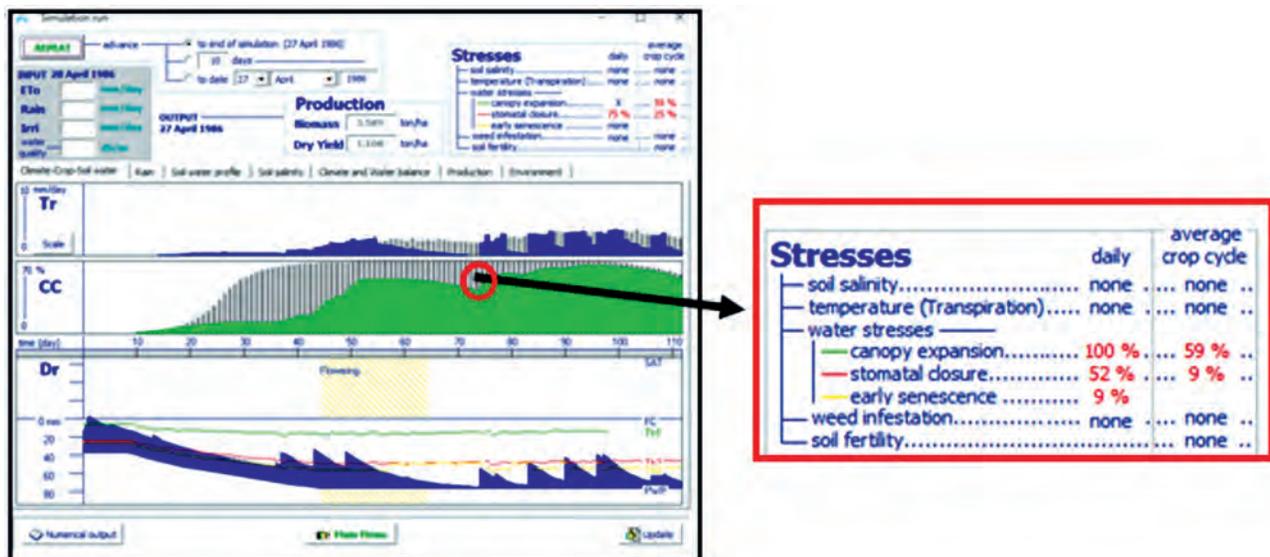


FIGURA 6. Salida del modelo con estrés antes de la floración para el año seco.

La cantidad de biomasa generada durante el ciclo de crecimiento del cultivo es una característica que define la producción, porque precisa el trabajo de la planta para producir su alimento y la producción final. Por su parte, la cobertura vegetal del cultivo

se ve restringida también en la medida que la disponibilidad de agua se reduce por debajo de algún límite crítico de la fracción de agua útil, influyendo en la producción de biomasa y a su vez en el rendimiento final.

De acuerdo con esto, los valores de rendimiento simulados ponen de manifiesto que cada cultivo experimenta durante su ciclo biológico condiciones de crecimiento particulares en función del comportamiento de las precipitaciones. Estos valores de producción pueden considerarse como referentes

de la capacidad productiva del ambiente de la zona estudiada y pueden resultar de gran utilidad en la programación de riego.

Efecto de la fertilidad del suelo en el rendimiento final de la soya

En la Tabla 6 se resume el efecto de la fertilidad del suelo en la biomasa, el rendimiento final de la soya y la productividad del agua en base a la ET para un año húmedo (1999), sin restricciones de agua.

TABLA 6. Salidas del modelo para la simulación del efecto de la fertilidad del suelo sobre la biomasa, el rendimiento y la productividad de la soya

Nivel de fertilidad	Biomasa	Rendimiento	WP _{ET}
Óptimo	8,75	3,01	0,66
Cercano al óptimo	6,2	2,12	0,46
Moderado	4,7	1,63	0,36
Media	3,9	1,35	0,31
Pobre	3,1	1,09	0,26
Muy pobre	1,96	0,68	0,17

El nivel de fertilidad del suelo ejerce un efecto significativo sobre la biomasa, el rendimiento y la productividad del agua de la soya. Una tendencia similar se observa en las tres variables de salida del modelo, con reducciones del orden de 77%.

Según Steduto *et al.* (2012) las plantas que crecen en suelos deficientes en nutrientes (N, P, y/o K) producen hojas más lentamente, con bastantes hojas inferiores senescentes o muy temprano, pero las hojas de más arriba y las más jóvenes permanecen verdes hasta la madurez o hasta muy cerca de la madurez. La capacidad fotosintética de las hojas deficientes es menor y su proporción entre fotosíntesis y transpiración es menor.

En la Figura 7 se presenta la variación de biomasa acumula-

da para diferentes niveles de fertilidad del cultivo usados por la herramienta *AquaCrop*. El modelo indica una alta sensibilidad al nivel de fertilidad del suelo; en dependencia del nivel se castiga o fortalece el desarrollo del follaje y en consecuencia la producción de biomasa total y rendimiento del grano.

Como se observa en la Figura 7, a partir del 26 de febrero (52 días después de plantada), la biomasa acumulada comienza a diferenciarse para cada nivel de fertilidad simulado, llegando al final del ciclo a alcanzar diferencias entre el nivel cercano al óptimo y el pobre de 3,3 t ha⁻¹; con este nivel tan bajo de fertilidad (o estrés por nutrientes minerales) solo se alcanza un 34% de cobertura del dosel, prácticamente la mitad con relación al óptimo.

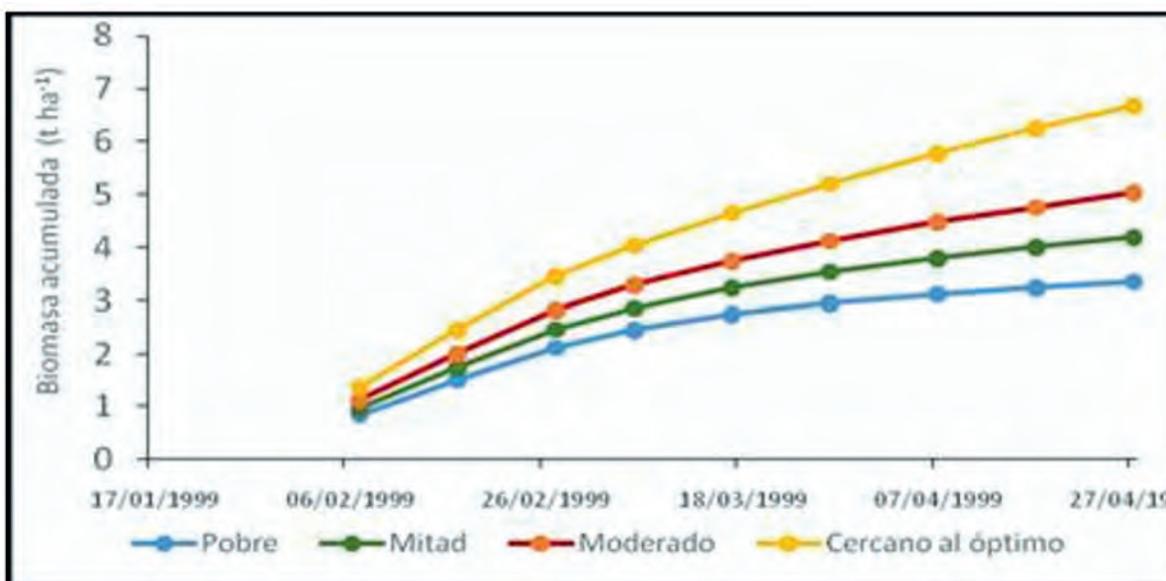


FIGURA 7. Simulación de los posibles efectos de niveles óptimo y limitado de nutrientes en el suelo en la producción de biomasa acumulada.

Resultados similares fueron publicados por Cortés *et al.* (2013) para cultivos de maíz y arroz, para condiciones de fertilidad del 100% lograron un aumento potencial del rendimiento cercano al 40%, con respecto al rendimiento del grano estimado en la

fase de ajuste con un nivel de fertilidad del 70%. Estos autores confirman la importancia de conocer el nivel de fertilidad del suelo para cada simulación y el índice de cosecha potencial, ya que estos dos parámetros son muy sensibles y son determinantes para obtener un buen resultado de la salida del modelo.

Los suelos Ferralíticos Rojos presentan alto contenido de hierro, bajos niveles de materia orgánica, normalmente son suelos muy productivos, pero su fertilidad natural es baja. Estos suelos tradicionalmente han estado sometidos a un uso agrícola intenso sin una óptica conservacionista, por lo que han experimentado un proceso de degradación (principalmente compactación) que ha afectado en cierta medida su fertilidad y productividad (IAgric, 2018).

Estudios recientes de Rodríguez *et al.* (2018) en el área de estudio indican valores bajos de materia orgánica del suelo (MOS) Ferralítico Rojo de 6% a (2,2 – 2,15%) hasta la profundidad de 20 cm, considerada la capa más fértil del suelo. Estos resultados ratifican la importancia de considerar tanto la fertilidad química como física del suelo para futuros trabajos de simulación.

CONCLUSIONES

- La calibración del modelo permitió optimizar los parámetros fundamentales de suelo y cultivo para su aplicación en las condiciones de estudio, destacándose la duración de las

fases fenológicas, el índice de cosecha, los límites de agotamiento de la reserva de agua para definir el estrés hídrico y la curva número.

- La validación del modelo demostró la precisión de los parámetros calibrados para la simulación de biomasa, cobertura vegetal y rendimiento de la soya, con valores de eficiencia de simulación superiores a 0,76, errores cuadráticos medios menores al 10% y coeficientes de determinación por encima de 0,9.
- La simulación mostró que el estrés hídrico en la soya antes de la floración para un año húmedo, es menos perjudicial que para un año seco, obteniéndose 2,25 t ha⁻¹, valores de productividad para biomasa y rendimiento superiores con respecto al seco.
- El estrés hídrico para un año seco antes de la floración, presenta entre los 30 y 50 días después de plantada, el período más crítico para la soya, con el 100% de inhibición de la expansión del crecimiento foliar. Mientras que entre 60 y 90 días, en plena etapa de floración y llenado del grano, un estrés hídrico del orden del 100% de inhibición de la expansión del crecimiento foliar, induce un 52% de cierre estomático y 9% de senescencia temprana, lo que provocó una disminución en el índice de cosecha a 30,9%.
- El nivel de fertilidad del suelo ejerce un efecto significativo sobre la biomasa, el rendimiento y la productividad de la soya, con una reducción similar del 77% en las tres variables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAYA, A.; KISEKKA, I.; HOLMAN, J.: "Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop", *Irrigation science*, 34(6): 465-481, 2016, ISSN: 0342-7188, DOI: 10.1007/s00271-016-0515-7.
- BOLIGON, M.R.; AMARAL, F.C.; FREIRA DE SILVA, G.T.: "Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for Southern Brazil", *Revista. Ceres*, 64(6): 567-573, 2017, ISSN: 0034-737X.
- CANDELARIA, M.B.; RUIZ, R.O.; GALLARDO, L.F.; PÉREZ, H.P.; MARTÍNEZ, B.A.; VARGAS, V.L.: "Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión", *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(3): 999-1010, 2011, ISSN: 1870-0462.
- CASTELLANOS, A.: *Evapotranspiración real de la soya (Glycine max) sembrada en invierno.*, no. 0138-8738, Inst. Centro de Información y Documentación Agropecuario, La Habana (Cuba), La Habana, Cuba, 33-42 p., 1986.
- CHATERLÁN, D.Y.: *Precisión en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. Caso de estudio: cultivos de ajo y cebolla en las condiciones edafoclimáticas del sur de Artemisa*, Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt", PhD Thesis, La Habana, Cuba, 143 p., 2012.
- CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, M.E.: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 42-46, 2011, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- CORTÉS, B.; BERNAL, P.; DÍAZ, A.; MÉNDEZ, M.: *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca*, Informe técnico proyecto de cooperación técnica TCP/COL/3302, Colombia, 62 p., 2013.
- DENKA, K.I.: "Simulations of the potential yields of Jenguma Soybean variety in the upper west region using Aquacrop Model", *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 3(5): 101-106, 2014, ISSN: 2277-8616.
- DÍAZ, P.Y.; VILLALOBOS, P.M.; GONZÁLEZ, R.F.; HERRERA, P.J.: "Validación del modelo AquaCrop en maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum vulgare* L. Monech)", *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(2): 3-10, 2018, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.: *Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Rome.*, Ed. FAO, Rome, 193 p., 1986, ISBN: 92-5-300744-3.
- ERGO, V.V.: *Estrés térmico y/o hídrico durante el llenado de grano en soja: impacto sobre el funcionamiento de la fuente y su efecto sobre el rendimiento*, Inst. Universidad Nacional de Córdoba, EEA INTA Manfredi, Argentina, 65 p., 2013.
- GONZÁLEZ, R.F.: *Funciones agua-rendimiento para cultivos de importancia agrícola en Cuba*, Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt", PhD Thesis, La Habana, Cuba, 140 p., 2013.
- GONZÁLEZ, R.F.; DELGADO, R.; DÍAZ, P.Y.; HERRERA, P.J.; LÓPEZ, S.T.; CID, L.G.: "Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo", *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(1): 3-12, 2018, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.

- REVISTA INGENIERÍA AGRÍCOLA, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 9, No. 1 (enero-febrero-marzo, pp. 3-13), 2019
- GONZÁLEZ, R.F.; HERRERA, P.J.; LÓPEZ, S.T.; CID, L.G.: “Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4): 21-27, 2014, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- GORMLEY, L.H.L.; SINCLAIR, F.L.: “Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Central”, *Agroforestería en las Américas*, (10): 103-108, 2003, ISSN: 1022-7482.
- HENG, L.K.; HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P.: “Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize”, *Agronomy Journal*, 101(3): 488-498, 2009, ISSN: 1435-0645.
- HERNÁNDEZ, A.; JIMÉNEZ, J.M.; BOSCH, D.; CASTRO, N.: *Clasificación de los suelos de Cuba*, Mayabeque, Cuba, 2015, ISBN: 978-959-7023-77-7.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J.; WILKENS, P.; PORTER, C.; BATCHELOR, W.; HUNT, L.; BOOTE, K.; SINGH, U.; URYASEV, O.; BOWEN, W.: *Decision support system for agrotechnology transfer version 4.6, [en línea]*, (Versión Versión 4.6), [Transfer (DSSAT) Versión 4.6], Honolulu, 2015, Disponible en: www.DSSAT.net.
- HSIAO, T.C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E.: “AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize”, *Agronomy Journal*, 101(3): 448-459, 2009, ISSN: 1435-0645.
- HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A.: “Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model”, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4): 1319-1330, 2011, ISSN: 2171-9292.
- JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T.: “The DSSAT cropping system model”, *European journal of agronomy*, 18(3-4): 235-265, 2003, ISSN: 1161-0301.
- LÓPEZ, G.; HERRERA, J.; CASTELLANOS, A.: “Agrupamiento de los suelos cubanos en clases hidrológicas para el cálculo del escurrimiento mediante el método de la curva número”, *Ingeniería Hidráulica*, 19(4): 22-26, 1998.
- LÓPEZ, S.T.; HERRERA, P.J.; GONZÁLEZ, R.F.; CID, L.G.; CHATERLÁN, D.Y.: “Eficiencia de un modelo de simulación de cultivo para la predicción del rendimiento del maíz en la región del sur de La Habana”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(3): 1-6, 2009, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- MERINO, J.D.: *Caracterización morfofisiológica y agronómica de cultivares de soja en siembra de invierno en suelo pardo con carbonato*, Universidad Central de Las Villas, D. Thesis, Santa Clara, Villa Clara, Cuba., 65 p., 2006.
- MORLA, F.D.; GIAYETTO, O.: “Calibración y validación del modelo AquaCrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba”, En: *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, Argentina, 2012.
- PELTZER, H.F.; PELTZER, N.G.: “Modelo de simulación de fenología de soja (Si. fe. soja) una herramienta útil para evitar el estrés hídrico durante el periodo crítico”, En: *Congreso de AgroArgentina Informática, CAI 2013, Córdoba, Argentina. 16–20 September.*, Argentina, pp. 115-160, 2013, ISBN: 1852-4850.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.; FERERES, E.: “Aquacrop reference manual”, *FAO, Rome, Italy*, 218, 2009a.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: “AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description”, *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447, 2009b, ISSN: 1435-0645.
- RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, A.; SEIJAS, T.L.; CAÑIZARES, J.A.M.; HERRERA, J.; LARA, O.H.: “Régimen hídrico en un suelo Ferralítico cultivado con maíz bajo principios de agricultura de conservación”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(3): 3-11, 2018, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.
- SILVA, V. de P.R. da; MACIEL, G.F.; BRAGA, C.C.; JÚNIOR, S.; SOUZA, E.P. de; ALMEIDA, R.S.R.; SILVA, M.T.; HOLANDA, R.M. de: “Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil”, *Ciência Rural*, 48(1), 2018, ISSN: 0103-8478, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161118>.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.; FERERES, E.; RAES, D.: “Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua”, *Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) spa no. 66*, 2012, ISSN: 9253085649.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: “On the conservative behavior of biomass water productivity”, *Irrigation Science*, 25(3): 189-207, 2007, ISSN: 0342-7188.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E.: “AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles”, *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437, 2009, ISSN: 1435-0645.
- TORNÉS, O.N.; BROWN, M.O.; GÓMEZ, M.Y.; GUERRERO, A.A.M.: “Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3): 25-30, 2016, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- WANI, S.; ALBRIZIO, R.; VAJJA, N.: *Sorghum.*, Ed. FAO, Irrigation and Drainage 66, In: Steduto, P, Hsiao, TC, Fereres E, Raes D (eds) Crop yield response to water ed., vol. FAO, Irrigation and Drainage 66, Rome, Italy, 144–151 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4.

Felicita González-Robaina, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Enrique Cisneros Zayas, e-mail: dptoriego1@iagric.cu

Julián Herrera-Puebla, e-mail: direccioninvest1@iagric.cu

Teresa López Seijas, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Greco Cid Lazo, e-mail: dptoambiente1@iagric.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.