

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL



<http://opn.to/a/dHEEg>

Calibración y análisis de sensibilidad del modelo *Aquacrop* para frijol en suelo Ferralítico Rojo compactado

Calibration and Sensitivity Analysis of Aquacrop Model's for Dry Bean in Red Ferralitic Soil

Dr.C. Felicita González-Robaina*, Ing. Darío López-Vargas, Dr.C. Enrique Cisneros-Zayas, Dr.C. Julián Herrera-Puebla, Dr.C. Greco Cid-Lazo.

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. La predicción del rendimiento de cultivos ha sido un objetivo prioritario, tanto con el fin de aumentar el conocimiento de las relaciones clima-agua-suelo-cultivo, como para generar información que se pueda aprovechar en la planificación y manejo de la producción agropecuaria. *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 calibrar el modelo para el cultivo de frijol en suelo Ferralítico Rojo compactado y realizar análisis de sensibilidad del modelo a los cambios en diferentes variables. Los datos se obtuvieron a partir de experimentos de campo realizados en la estación experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, en el municipio Alquizar. Entre los principales resultados se obtuvo que las predicciones del rendimiento del frijol del modelo fueron buenas con un valor de 0,21 t·ha⁻¹ para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), eficiencias de modelación superiores a 0,88 e índice de Willmott (d) de 0,94. Se evidencia la posibilidad de alcanzar rendimientos de 2,63 t·ha⁻¹ si el cultivo no se somete a ningún tipo de limitación. Para el análisis de sensibilidad del modelo *AquaCrop* se deben considerar como variables importantes la disponibilidad de agua, el grado de fertilidad y las características hidrofísicas del suelo, por tener una relación directa con la biomasa y el rendimiento del frijol.

Palabras clave: rendimiento, biomasa, productividad, agua disponible.

ABSTRACT. The prediction of crop yield has been a priority objective, both in order to increase the knowledge of climate-water-soil-crop relationships, and to generate information that can be used in the planning and management of agricultural production. *AquaCrop* is a simulation model designed to analyze the productivity of different crops in response to the water available. The objective of the work was to calibrate the model for the cultivation of beans in compacted Red Ferralitic soil and perform sensitivity analysis of the model to changes in different variables. The data were obtained from field experiments conducted at the experimental station of the Irrigation and Drainage Research Institute, Alquizar municipality. Among the main results, it was obtained that the predictions of the bean yield of the model were good with a value of 0,21 t ha⁻¹ for the square root of the mean square of the error (RMSE), modeling efficiencies greater than 0,88 e. Willmott's index (d) of 0,94. The possibility of reaching yields of 2,63 t ha⁻¹ is evidenced if the crop is not subject to any type of limitation. For the sensitivity analysis of the *AquaCrop* model, the availability of water, the degree of fertility and the hydrophysical characteristics of the soil should be considered as important variables, as it has a direct relationship with biomass and bean yield.

Keywords: yield, biomass, productivity, water available.

INTRODUCCIÓN

La práctica de riego es uno de los procesos más complejos que debe realizar el agricultor debido a la multitud de factores implicados en el manejo del agua: se requiere de información técnica para el conocimiento preciso entre

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

Recibido: 02/02/2019.

Aprobado: 29/07/2019.

el agua usada y el rendimiento de los cultivos (García *et al.*, 2009; Domínguez *et al.*, 2012).

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).

Entre los modelos existentes se encuentra el *AquaCrop-FAO* Raes *et al.* (2009); Steduto *et al.* (2009), modelo de aplicación general de cultivo, el cual se ha utilizado en varias zonas del mundo bajo diferentes condiciones ambientales. El mismo es desarrollado por la FAO con la ventaja de ser relativamente sencillo en comparación con otros modelos de simulación de rendimientos, por lo que con solo calibrar algunos parámetros se obtienen resultados similares a la realidad. Esto facilita el uso del modelo en tanto la información necesaria para adaptarlo a las condiciones de nuestro país no sea tan grande en comparación a otros modelos y la plataforma del software resulte ser de fácil manejo.

Recientemente, González *et al.* (2018) y González *et al.* (2019) calibraron y validaron el modelo *AquaCrop* para maíz, sorgo y soya en suelo Ferralítico Rojo compactado en Cuba (municipio Alquizar, Provincia 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, 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 para la determinación del escurrimiento superficial.

La validación de un modelo es la aprobación, a través de procedimientos estadísticos adecuados, del ajuste entre lo simulado y observado de tal modo que las interpretaciones del sistema real, sean correctas. Sin embargo, la sensibilidad de los modelos al rango de condiciones agroecológicas en que se desarrollan los sistemas a evaluar es un requisito indispensable para definir su utilidad e implica, de manera estricta, el estudio de la variación de sus resultados en función de diferenciaciones graduales en el valor de sus parámetros (Tiftonell, 2007, citado por Giayetto y Morla, 2013).

Varios autores han realizado análisis de sensibilidad al modelo *Aquacrop* (Raes *et al.*, 2006; Giayetto y Morla, 2013; Cortés *et al.*, 2013), variando datos de entrada de parámetros climáticos, parámetros del cultivo, profundidad de raíces y el factor de agotamiento para el estrés hídrico y del suelo; encontrando por ejemplo, que alteraciones del coeficiente del cultivo pueden provocar sobre y subestimación de la transpiración, el estrés hídrico y la producción del cultivo.

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) forma parte del grupo de las leguminosas comestibles. Este grano se considera estratégico, no solo por sus propiedades nutricionales y culinarias, sino además por su presencia en los cinco continentes del mundo y su importancia para el desarrollo rural y social de muchas economías (Thornton, 2014). La mayor contribución del frijol común en Cuba está asociada a la sustitución de importaciones y la seguridad alimentaria, los granos contienen

una abundante gama de vitaminas, fibra vegetal y minerales, entre los que se destaca el hierro. Sin embargo, su mayor valor nutricional radica, básicamente, en un alto contenido proteico que oscila entre el 12% y el 25% del peso de las semillas secas, es decir, 2,5 veces mayor al de los cereales (IIG-MINAG, 2013).

El objetivo de este trabajo fue calibrar el modelo *AquaCrop-FAO* para el cultivo de frijol en suelo Ferralítico Rojo compactado para las condiciones climáticas de la región de Alquizar, Artemisa y realizar un análisis de sensibilidad del modelo a los cambios medioambientales.

MÉTODOS

Localización del área de estudio

El modelo se calibró con datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (noviembre-marzo), en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, en el municipio de Alquizar, coordenadas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' W, altura sobre el nivel medio del mar 6 m, a 12 km de la costa. Estos experimentos se llevaron a cabo con el objetivo de estudiar el efecto de la escasez de agua sobre el desarrollo del cultivo y el rendimiento del frijol negro de la variedad Cueto 25-9 (Giralt, 1979). La fecha de siembra fue el 17 de noviembre, la madurez se alcanzó a los 109 días después de la siembra, la densidad de población fue 222 000 plantas ha⁻¹, el rendimiento máximo fue de 2,63 t ha⁻¹ y el método de riego fue aspersión semiestacionario de media intensidad.

Según Giralt (1979) la temperatura media mínima y máxima variaron entre los 20 y 31°C respectivamente, la lluvia total para los meses en estudio fue de 167,7 mm. El mayor valor de precipitación caída correspondió al mes de diciembre con un total de 64,1 mm, mientras que el mes de menor valor fue noviembre con 12,8 mm mensual. La evapotranspiración de referencia (ET_o) tuvo un valor total para los meses en estudio de 371,9 mm. Los valores máximos de evapotranspiración diaria se observaron en las fases de floración-fructificación (3,34-3,98 mm). Los promedios mensuales máximos y mínimos corresponden a el mes de enero (132,9 mm) y noviembre (30,7 mm), respectivamente.

En la Figura 1 se muestra el balance hídrico decenal de precipitación y ET_o para la zona y meses en estudio, donde se refleja la variación de ambos parámetros. Este balance hídrico es negativo para 7 decenas (58%) 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.

El tipo de suelo en estudio es Ferralítico Rojo compactado según la segunda clasificación genética de los suelos de Cuba (Instituto de Suelo, 1980) de la zona sur de La Habana. Esta zona forma parte de la llanura cársica Habana-Matanzas, muy plana, con una altura inferior a 30 metros del nivel del mar y donde la agricultura es la actividad económica fundamental. Las propiedades físicas fundamentales para cada capa del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado han sido reportadas y actualizadas por Cid (2006) y Cid *et al.* (2011) y se resumen en la Tabla 1 y conforman el fichero de suelo que se utilizó para todas las corridas del modelo.

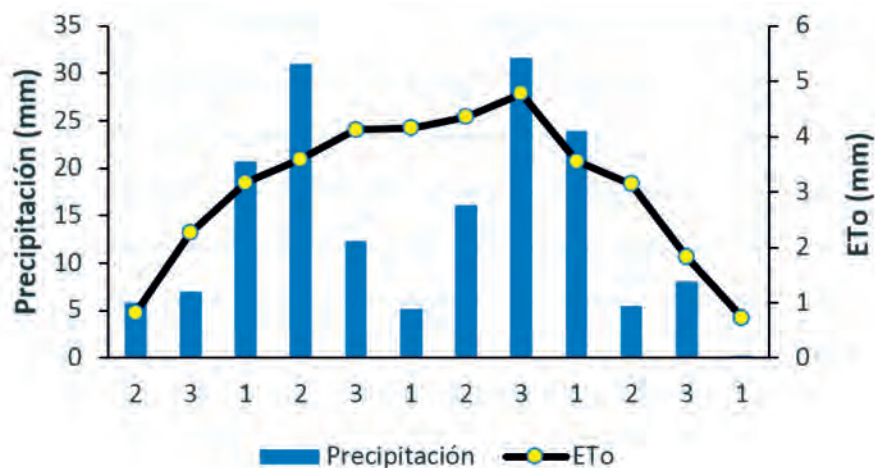


FIGURA 1. Balance hídrico decenal para los meses de noviembre-marzo en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, en Alquízar.

TABLA 1. Análisis granulométrico y otras propiedades y parámetros físicos e hidrofísicos del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado

Prof. (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	da a θ_{FC} ($g\ cm^{-3}$)	θ_{FC} ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_{WP} ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_{satur} ($cm^3\ cm^{-3}$)	K_{sat}	Pt ($mm\ día^{-1}$)	(%)	$V_{inf. básica}$ ($m\ día^{-1}$)
20	20,9	57,4	21,7	1,18	0,394	0,28	0,537	42,5	53,73		
40	17,7	61,8	20,5	1,28	0,431	0,288	0,494	25,2	49,41	4,9	
60	28,9	62,8	14,3	1,2	0,397	0,274	0,528	19,9	52,76		
80	20,3	61,4	18,3	1,2	0,396	0,285	0,516	16,3	51,61		
100	20,1	61,5	18,4	1,2	0,396	0,286	0,516	16,3	51,61		

Nota: $da a \theta_{FC}$ densidad volumétrica o aparente del suelo determinada; θ_{FC} contenido de agua en el suelo correspondiente a capacidad de campo; θ_{WP} contenido de agua en el suelo correspondiente al punto de marchitez permanente; θ_{satur} contenido de agua en el suelo a la saturación; K_{sat} conductividad hidráulica del suelo saturado; Pt porosidad total del suelo; $V_{inf.bas}$ velocidad de infiltración básica en el suelo.

Según estos autores de acuerdo a su funcionamiento hídrico, el suelo presenta un comportamiento diferenciado en la capa de 0-20 cm con respecto a los valores de densidad aparente, el proceso de retención de humedad y de la conductividad hidráulica. A partir de los 40 cm hay una capa más compactada que diferencia estos procesos hidrodinámicos.

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) según López *et al.* (1998), 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. Para la calibración del modelo se optó por no evaluar de

manera particular ninguna reducción del crecimiento asociada al nivel de fertilización, evitando la mayor complejidad que supone analizar la interacción entre la disponibilidad de agua y la nutrición de los cultivos.

Modelo AquaCrop

De acuerdo a lo reportado por Raes *et al.* (2009), el modelo AquaCrop consta de varias ecuaciones que, con datos de clima, densidad de población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico, simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo. En la Tabla 2 se muestran las ecuaciones que AquaCrop utiliza para el cálculo de biomasa y producción de grano.

TABLA 2. Ecuaciones usadas por AquaCrop para la estimación de biomasa y producción de grano (tomado de Ruiz *et al.*, 2018)

Variable	Ecuación	Descripción
Biomasa acumulada producida ($kg\ m^{-2}$)	$B = WP \sum Tr$	WP es el parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m^3 de agua transpirada) Tr es la transpiración del cultivo (ya sea mm o m^3 por unidad de superficie) con la suma respecto al tiempo en el que se produce la biomasa

Variable	Ecuación	Descripción
Rendimiento del cultivo	$Y = B \cdot Hi$	B es la biomasa del cultivo y Hi índice de cosecha* dependiendo del tipo y variedad del cultivo.
Índice de área foliar	$CC=1,005 \cdot [1-\exp (-0,6 LAI)]^{1,2}$	Ajuste del crecimiento del dosel vegetal con respecto a la densidad de población (plantas ha ⁻¹). Estimación a partir de datos de índice de área foliar (IAF).
Productividad agronómica del agua (WP)	$WP_B = \frac{B}{ET}$ $WP_Y = \frac{R}{ET}$	El numerador se expresó en términos de biomasa y de rendimiento del cultivo (kg), mientras que en el denominador se usó la evapotranspiración (ET, m ³), ambos referidos a una hectárea.

* Hi- índice de cosecha según Raes *et al.*(2009) relación entre el rendimiento en grano y la biomasa total producida en el cultivo del frijol.

Respetando el concepto original de un vínculo directo entre el uso del agua en el cultivo y su rendimiento, el modelo *AquaCrop* evolucionó a partir del enfoque del Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 33, al separar la evaporación del suelo no productiva (E) de la transpiración del cultivo productiva (Tr) y al estimar la producción de biomasa directamente a partir de la transpiración del cultivo real mediante un parámetro de productividad del agua. En la mayoría de los cultivos, solo una parte de la biomasa producida se destina a los órganos cosechables para producir rendimiento (Y), y la relación entre el rendimiento y la biomasa se conoce como índice de cosecha (Hi), por tanto, los procesos subyacentes que culminan en B y Hi se diferencian claramente entre sí. En consecuencia, la separación de Y en B y Hi permite considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en B y Hi por separado (Raes *et al.*, 2009).

Una descripción minuciosa de las principales características de *AquaCrop* aparece en el Boletín de la FAO: Riego y Drenaje N° 66 por Steduto *et al.* (2012); donde se explica detalladamente los conceptos básicos y los procedimientos fundamentales de cálculo, acompañados de descripciones adicionales relacionadas con los requerimientos de datos de entrada, la interfaz del usuario y los resultados del modelo.

Se debe especificar el contenido de agua de las capas del perfil del suelo al comienzo del período de simulación, a menos que esté en capacidad de campo. Se consideró un contenido

de agua en el suelo de 0,37 cm³·cm⁻³, que representa el 90% del contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (0,39 cm³·cm⁻³) hasta una profundidad de 0,40 m.

Análisis de sensibilidad

Para entender la sensibilidad del modelo a los cambios en las características medioambientales y cómo esa susceptibilidad puede afectar las salidas en biomasa y rendimientos, se seleccionaron algunas de las principales entradas del modelo que fueron modificadas dentro de un rango específico para observar cómo se veían alterados los rendimientos del cultivo, según procedimiento propuesto por Cortés *et al.* (2013). Todas las comparaciones de variación porcentuales que se realizaron fueron respecto a los valores de los rendimientos finales en la etapa de ajuste del modelo. El análisis de sensibilidad se llevó a cabo sobre las siguientes entradas:

- Diferente profundidad del Nivel freático
- Diferente nivel de fertilidad del suelo
- Diferentes láminas rápidamente aprovechables (RAW).
- Considerando diferentes texturas de suelo
- Respecto a las simulaciones de los valores de rendimiento para diferentes texturas en este análisis se tomaron las características hidrofísicas que se encuentran por defecto en el módulo de suelos de *AquaCrop* (Tabla 3).

TABLA3. Características hidrofísicas de las texturas evaluadas con el modelo *AquaCrop*.

Textura	PMP (% vol.)	CC (% vol.)	SAT (% vol.)	TAW (mm□m ⁻¹)	Ksat (mm□día ⁻¹)
Arenoso (Ar)	6	13	36	70	3000
Franco Arenoso (F-Ar)	10	22	41	120	1200
Franco (F)	15	31	46	160	500
Franco Limoso (F-L)	13	33	46	200	150
Franco Arcilloso (F-A)	23	39	50	160	125
Arcilloso (A)	39	54	55	150	35

PMP: contenido de agua del suelo en % de volumen a punto de marchitez permanente

CC: contenido de agua del suelo en % de volumena capacidad de campo

SAT: contenido de agua del suelo en % de volumen a saturación

TAW: Agua Disponible Total en el Suelo (Total Available Soil Water)

Ksat: Conductividad hidráulica del suelo saturado

Validación del modelo

Después de realizar la calibración del modelo *AquaCrop* con el experimento de Giralt (1979), 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 y los estadígrafos: raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), la eficiencia de modelación (EF) y el índice de Willmott (d), calculados 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.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del modelo

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. De acuerdo a los resultados encontrados en el proceso de ajuste se modificaron algunos parámetros conservativos con relación a los que propone el modelo en su base de datos, como se pueden observar en la Tabla 4.

TABLA 4. Parámetros utilizados en la calibración de AquaCrop en frijol para suelo Ferralítico Rojo compactado

Parámetro	Valor original	Valor usado
Densidad de plantación (plantas·ha ⁻¹)	131579	222000
Cobertura máxima del dosel (%)	99	92
Expansión del dosel (%·día ⁻¹)	11,8	10,8
Declive del dosel (%·día ⁻¹)	8,6	10,9
Emergencia (días después de plantación)	6	7
Máxima cobertura del dosel (días después de plantación)	64	65
Inicio de la senescencia (días después de plantación)	75	80
Inicio de la floración (días después de plantación)	47	48
Longitud de florescencia (días)	20	20
Madurez (días después de plantación)	115	109
Máxima profundidad efectiva radicular (m)	1,70	0,40
Máxima profundidad radicular (días después de plantación)	75	68
Máxima evapotranspiración del cultivo	1,05	1,05
Productividad del agua normalizada (g m ⁻²)	15	14
Índice de cosecha (Hi) (%)	40	33
Curva número	65	71
Evaporación del agua en la capa superficial del suelo (mm)	9	10
Capa impermeable de suelo (m)	-	0,4

La cobertura inicial y máxima del dosel vegetal fueron del 2,22 y 92%, respectivamente, mientras que el coeficiente de declive del dosel por día fue estimado como 10,9%, valores que difieren de los originales calibrados en el modelo para frijol. 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 plantado el frijol para lograr la máxima cobertura, el comienzo de la floración y la senescencia; 65, 48 y 80 días, respectivamente.

El índice de cosecha (Hi) considerado fue de 0,33, 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 a 0,5) que propone Wani *et al.* (2012).

El modelo tiene predeterminado el valor de la productividad del agua normalizada para frijol de 15 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2012). Los ajustes de *AquaCrop* normalizan la productividad del agua según la concentración de CO₂ atmosférico, año tras año, en el caso particular de este trabajo este valor fue de 14 g m⁻², inferior al considerado por Hsiao *et al.* (2009), y aspecto a tener en cuenta en otras simulaciones con este modelo.

En la Tabla 5, se muestran los resultados de la calibración del modelo *AquaCrop* para frijol en suelo Ferralítico Rojo compactado en Alquízar. Los valores de rendimiento y productividad del agua están en el intervalo publicado en trabajos precedentes de González (2013). En el caso particular del rendimiento en experimentos de campo varió entre 0,63 - 2,67 t·ha⁻¹ y la productividad en base al rendimiento alcanzó valores de 0,97kg·m⁻³.

TABLA 5. Resultados de la corrida del modelo para la calibración del frijol

Producción (t·ha ⁻¹)		Parámetros de balance de agua en el suelo (mm)		Productividad del agua (kg m ⁻³)	
Biomasa	7,83	Evaporación total	115	Biomasa	2,10
		Transpiración	250,5		
Rendimiento	2,63	Escorrentía	17,2	Rendimiento	0,72
		Infiltración	440,5		
		Drenaje	57,1		

Resultados muy similares a los encontrados en este trabajo fueron publicados por Ruiz *et al.* (2018). Estos autores, para analizar el desempeño agronómico del frijol con un ciclo de 128 días en diferentes escenarios climáticos en Colombia, se apoyaron en el modelo *AquaCrop* para simular productividad del agua en base a la lámina bruta e índice de cosecha, encontrando valores entre 0,87-0,98 kg m⁻³ y 35%, respectivamente.

En la Figura 2 se presenta la salida del modelo *AquaCrop* para el cultivo del frijol. En la misma, 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 apreció un agotamiento de la humedad del suelo

en la zona radicular (reducción promedio en la expansión foliar en un 5%) en la segunda decena de diciembre y enero, causado por la ausencia de lluvia y riego en varios días consecutivos, lo que no provocó reducción en los rendimientos finales.

Se encontró así que el valor de cobertura vegetal final (CC), determinado con datos experimentales fue de un 87%, mientras que el simulado fue de 89%, en todo el ciclo se sobrestimó la cobertura por el modelo, presentándose una diferencia de solo el 2%. Es importante que la calibración de valores de cobertura foliar sea correcto ya que para el modelo *Aquacrop* este parámetro afecta la tasa transpiratoria y en consecuencia la acumulación de biomasa (Farahani *et al.*, 2009).

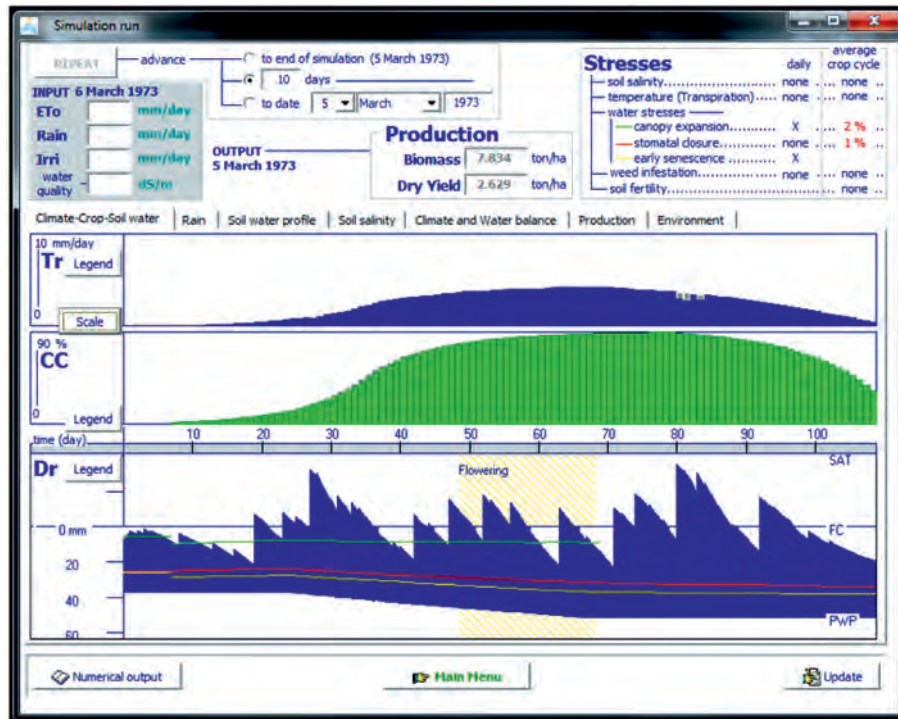


FIGURA 2. Salidas del modelo para frijol.

En la Figura 3 se muestra el seguimiento de la evaporación y transpiración a lo largo del ciclo del cultivo. Se observa una transpiración máxima de 4,3 mm entre los 66-70 días de plantando el frijol, período que coincide con la floración y generalmente considerado como de mayor consumo y además, según Merino (2006) crítico para alcanzar altos rendimientos en los granos.

Por su parte, Ergo (2013) ha señalado que no todo el ciclo del cultivo resulta igualmente crítico, sino que este periodo 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 los granos, alrededor de los 90 días de plantado, con valores de transpiración que pueden alcanzar los 3,4 mm día⁻¹.

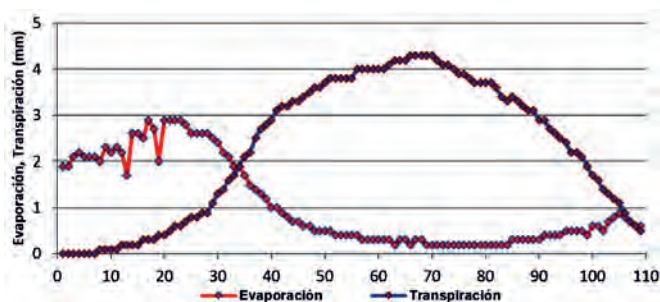


FIGURA 3. Seguimiento de la evaporación y la transpiración del frijol.

Análisis de sensibilidad

Comportamiento del modelo *AquaCrop* a diferente profundidad del nivel freático

Tomando como condición de entrada en el modelo una profundidad del nivel freático de 8 m, se puede observar en la Figura 4 que el comportamiento del rendimiento en el cultivo de frijol ante variaciones en la profundidad del nivel freático (de 1 a 2 metros) no presenta afectaciones importantes para profundidades mayores a un metro; para este mismo rango de profundidad la tasa de cierre estomático no se incrementa.

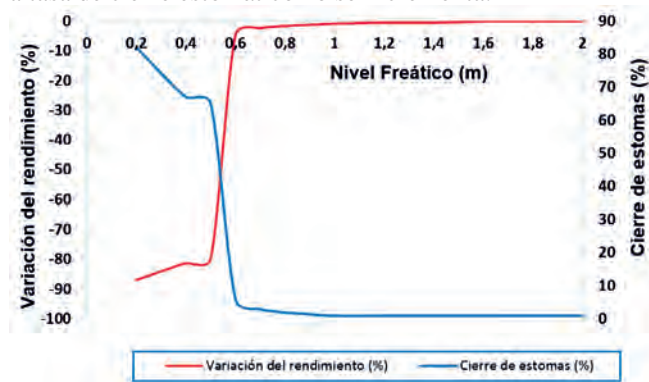


FIGURA 4. Variación del rendimiento y cierre de estomas simulados con el modelo *AquaCrop* bajo diferentes profundidades del nivel freático.

Mientras que para niveles inferiores a un metro se mostrarían reducciones considerables en el rendimiento del grano, esto ocasionado, según el modelo, por un cierre de estomas dada la disminución de oxígeno en el suelo, la cual reduce la respiración de la planta y afecta el proceso de transpiración. Resultados similares fueron encontrados por Herrera *et al.* (1988) para frijol en Cuba y Cortés *et al.* (2013) en zonas representativas de producción de maíz en Colombia.

Adicionalmente, para niveles freáticos elevados, cercanos a la máxima profundidad de la raíz (0,4 m), la disminución del rendimiento se encuentra entre el 79 y 87%, presentándose un cierre de estomas de entre el 65% y 82%. Para niveles más elevados, se presentaría pérdida total del grano, ya que la planta no alcanzaría un desarrollo y producción del grano por asfixia.

Comportamiento del modelo *AquaCrop* a diferente nivel de fertilidad del suelo

En el modelo *AquaCrop* la reducción de la fertilidad está directamente relacionada con la modificación de los parámetros

de desarrollo del follaje, y en consecuencia con la producción de biomasa y rendimiento. En la Figura 5, se evaluó el comportamiento del rendimiento respecto a la variación del nivel de fertilidad y se observa que a medida que disminuye este nivel, la producción lo hace gradualmente. Teniendo como base el ajuste de fertilidad de 80% para frijol en suelo ferralítico, se encontró que bajo condiciones de fertilidad de suelo de 100% se observan incrementos de 25,4% en el rendimiento. Es importante resaltar que el modelo *AquaCrop* asume nivel de fertilidad constante durante todo el ciclo de cultivo.

Por otro lado, con condiciones de fertilidad baja o pobre (alrededor del 40%), el rendimiento del cultivo se reduce en cerca del 49,8%, respecto al valor de referencia; y en condiciones de muy pobre puede alcanzar el 68%.

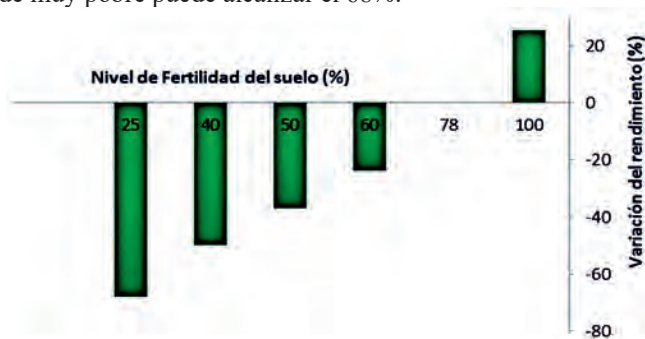


FIGURA 5. Variación del rendimiento agronómico simulado con el modelo *AquaCrop* bajo diferentes niveles de fertilidad del cultivo.

Comportamiento del modelo *AquaCrop* a diferentes porcentajes de agua fácilmente aprovechable (RAW)

AquaCrop realiza balances hídricos internos con el fin de determinar las necesidades de agua para la planta y con base en el contenido de humedad, variables hidrofísicas del suelo, entre otras; simula el desarrollo, crecimiento y producción. En la Tabla 6, se puede observar que la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo es vital para el buen desarrollo de la planta. La aplicación de riego en el cultivo permitiría aumentar los rendimientos en un 25% y reducir el porcentaje en la inhibición de la expansión del dosel vegetal de 39 a 0%.

TABLA 6. Variación del rendimiento, lámina de riego y porcentaje en la inhibición de la expansión del dosel vegetal para diferentes porcentajes de agua fácilmente aprovechable (RAW)

RAW	Lamina (mm)	Rendimiento	% expansión
0% RAW	247,9	2,64	0
20% RAW	228,7	2,64	0
40% RAW	216	2,63	1
50% RAW	211	2,63	4
60% RAW	205	2,56	7
80% RAW	195	2,48	18
100% RAW	185	1,96	39

Cuando se mantiene el límite de la humedad del suelo entre el 0% (Capacidad de Campo) y el 50% de RAW como criterio

de aplicación de riego, no hay incrementos considerables en las salidas del modelo *AquaCrop* para el rendimiento, por lo que se estaría sobre aplicando agua (63 mm), perdiéndose esta lámina de riego en percolación profunda y escorrentía superficial. Lo anterior indica que para el cultivo del frijol no es necesario llegar a condiciones de capacidad de campo para obtener los mejores rendimientos.

De Faria *et al.* (1997) encontraron una disminución importante en el rendimiento cuando los niveles de humedad del suelo se redujeron a menos del 40% del agua total disponible y recomendaron que el nivel no debe descender del 60%.

En un ambiente de crecimiento húmedo Heinemann *et al.* (2016), compararon varias cantidades de agua (5, 6 y 7 mm·día⁻¹) y concluyeron que los mayores rendimientos se obtuvieron cuando se aplicaron 6 mm·día⁻¹ y la humedad disponible del suelo era el 70% en los primeros 30 cm en el momento de la aplicación. El frijol es un cultivo de raíces poco profundas extrae el 85% del agua de los primeros 40 cm del perfil del suelo (Muñoz *et al.*, 2007).

Según Fernández (2013), el modelo *AquaCrop* es sumamente sensible al agua que ingresa al perfil del suelo, dado que esta se convierte en transpiración y luego por el parámetro de productividad de agua se convierte en biomasa, por lo que su variación puede disminuir considerablemente la biomasa y los rendimientos esperados.

Comportamiento del modelo *AquaCrop* para diferentes texturas de suelo

En la Figura 6 se evaluó el comportamiento del rendimiento respecto a la variación de las características texturales del suelo y se observa que la textura franco (F) permite un mejor desarrollo del cultivo, ya que la cantidad de agua almacenada y las tasas de infiltración permiten que las raíces absorban con mayor facilidad la cantidad de agua requerida para su desarrollo y a su vez se puedan anclar al terreno adecuadamente.

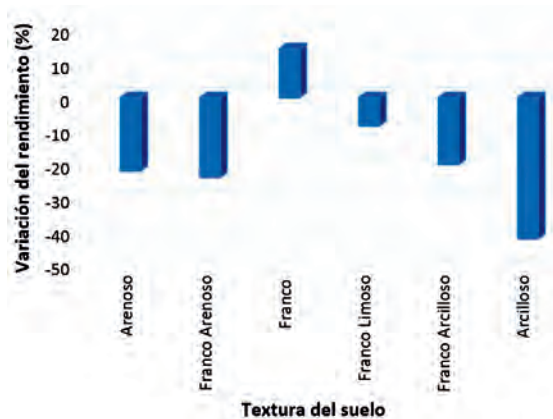


FIGURA 6. Variación del rendimiento agronómico simulado con el modelo *AquaCrop* considerando diferentes texturas del suelo.

Para esta textura se observó un aumento en rendimiento de 14,5 % con respecto al suelo de referencia utilizado. Para las demás texturas las salidas simuladas fueron siempre menores a las halladas en la etapa de ajuste.

Según resultados de Cortés *et al.* (2013a), los suelos con fracciones de arenas disminuyen la productividad agrícola,

debido a su baja capacidad de retención de humedad, siendo menor la cantidad de agua disponible para ser absorbida y posteriormente transpirada por la planta.

Raes *et al.* (2006) consideran que en los suelos más permeables las modificaciones de la conductividad hidráulica producen cambios menores en los rendimientos, mientras que en suelos con mayor contenido de arcilla una disminución drástica de la conductividad hidráulica da lugar a alteraciones importantes de los valores simulados del escurrimiento superficial, la cantidad de agua infiltrada en el perfil del suelo, la tasa de transpiración y la correspondiente producción. Variaciones de la cantidad máxima de agua que se puede conservar en la zona de la raíz solamente produjo efectos moderados.

En el presente estudio las mayores disminuciones se presentaron para la textura arcillosa con valores mayores al 42% en rendimiento. En el caso de las texturas arcillosas el parámetro que afecta las salidas de rendimiento es la conductividad hidráulica saturada, la cual al ser baja impide el libre movimiento del agua en el perfil del suelo.

El valor de referencia utilizado fue un suelo Ferralítico Rojo compactado, 57-61% arcilla, que presentan buenas condiciones de drenaje interno pero ha perdido propiedades físicas debido a su sobreexplotación (compactación).

Los suelos Ferralíticos Rojos son generalmente arcillosos (hasta más de 90% de partículas menores de 0,001 mm) en el subtipo típico, lo que unido a la casi ausencia de minerales alterables y poco contenido de limo, constituye un índice del alto grado de evolución de los mismos. Predominan los minerales arcillosos no dilatables.

Estos suelos tienen un alto contenido de arcilla (igual o más de 90%) y un pequeño contenido de materia orgánica, sin embargo muestran uniformidad física y química en profundidad. Presentan además buen estado de agregación y no son dilatables. Trabajos anteriores en el mismo suelo y lugar de Cid (1995), señalan la existencia de una capa compacta entre los 30 y los 50 cm. Esta capa endurecida es típica en este tipo de suelo debido fundamentalmente a la cantidad y calidad de arcilla predominante y a factores antrópicos.

En este análisis de sensibilidad del modelo *AquaCrop* se deben considerar como variables importantes la disponibilidad de agua, el grado de fertilidad del suelo y las características hidrofísicas del suelo. Las láminas de riego y los posibles aportes por ascenso capilar modifican de manera importante los valores de producción. De igual forma las disminuciones en el porcentaje de fertilidad del suelo tienen una relación directa con la biomasa y el rendimiento del frijol.

Validación del modelo

En la Tabla 7 se exponen los estadígrafos seleccionados en la validación del modelo en el cultivo de frijol para las variables de salida: biomasa aérea, rendimiento y cobertura vegetal. El seguimiento de la biomasa medida en campo y simulada con el modelo, muestra valores para esta variedad de 7,5 t ha⁻¹ y de 7,83 t ha⁻¹, respectivamente, presentando una diferencia de 330 kg ha⁻¹, lo que representa en términos porcentuales menos del 5%. Los resultados indican que las predicciones de la biomasa del modelo fueron buenas (RMSE=0,82 t ha⁻¹, EF=0,88 y d=0,94).

TABLA7. Estadígrafos seleccionados en la validación del modelo

Estadígrafo	Variables de salida		
	Biomasa	Rendimiento	Cobertura
RMSE	0,82	0,21	0,72
EF	0,88	0,94	0,90
d	0,94	0,99	0,96
r	0,99	0,99	0,95
pendiente	0,87	0,90	1,03
R ²	0,96	0,97	0,92

Para las tres variables de salida cobertura del dosel, producción de biomasa y rendimiento, la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) indica un desempeño bueno en la simulación. La eficiencia está cercana a 1, que es el valor óptimo y d está en el rango establecido (entre 0 y 1). El anterior comportamiento se corrobora a través del coeficiente de correlación con valores de 0,99, 0,99 y 0,95, 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.

Estos resultados demuestran que el modelo *AquaCrop* explica adecuadamente el desarrollo del crecimiento de frijol, evaluados bajo las condiciones ambientales y edáficas de suelo

Ferralítico Rojo compactado en Alquizar, provincia Artemisa.

CONCLUSIONES

- Los resultados de la calibración del modelo permitieron optimizar los parámetros fundamentales de suelo y del cultivo de frijol para su aplicación en las condiciones de estudio, destacándose la duración de las fases fenológicas, el índice de cosecha y la curva número.
- Se evidencia la posibilidad de alcanzar rendimientos de 2,63 t ha⁻¹, si las precipitaciones son suficiente en este periodo poco lluvioso y el cultivo no se somete a ningún tipo de limitación salvo: la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura.
- El análisis de sensibilidad del modelo *AquaCrop* a los cambios en las características medioambientales demostró cómo se pueden afectar las salidas en rendimientos del frijol y que se deben considerar como variables importantes la disponibilidad de agua, la profundidad del nivel freático, el grado de fertilidad del suelo y las características hidrofísicas del suelo.
- La validación del modelo demostró la precisión de los parámetros calibrados para la simulación de biomasa, cobertura vegetal y rendimiento, con valores de eficiencia de simulación superiores a 0,88, errores cuadráticos medios menores al 10% y coeficientes de determinación por encima de 0,92.

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: 465-481, DOI: 10.1007/s00271-016-0515-7.
- CID, L.G.: *Introducción de métodos y metodologías para la caracterización de las propiedades hidrofísicas, así como las variaciones espacio-temporales*, Inst. Instituto de Investigaciones Riego y Drenaje, Informe del contrato 004-17, La Habana, Cuba, 45 p., 1995.
- CID, L.G.: "Parámetros fundamentales para la caracterización hidropedológica general de los suelos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(4): 42-47, 2006, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- CID, L.G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, P.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, A.: *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá*, Inst. TCP/COL, Informe técnico proyecto de cooperación técnica TCP/COL/3302, Colombia, 62 p., 2013.
- 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*, Inst. TCP/COL, Informe técnico proyecto de cooperación técnica TCP/COL/3302, Colombia, 62 p., 2013a.
- DE FARIA, R.T.; OLIVEIRA, D.; FOLEGATTI, M.V.: "Determination of long term optimal irrigation strategy for dry beans in Parana", *Scientia Agricola*, (54): 155-164, 1997, ISSN: 0103-9016.
- DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ, R. S.; DE JUAN, J. A.; MARTÍNEZ, R. A.; TARJUELO, J. M.: "Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semiarid environment", *Agricultural Water Management*, 107: 42-53, 2012, ISSN: 0378-3774.
- 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, Córdoba, Argentina, 65 p., 2013.
- FARAHANI, H.J.; IZZI, G.; OWEIS, T.Y.: "Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton", *Agronomy Journal*, 101(3): 469-476, 2009, ISSN: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- FERNÁNDEZ, M.E.: *Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del Modelo AquaCrop*, Inst. Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo-FONADE e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, Segundo informe, Colombia, 33p., 2013.
- GARCÍA, V. M.; FERERES, E.; MATEOS, L.; ORGAR, F.; STEDUTO, P.: "Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop", *Agronomy Journal*, 101:477- 487, 2009, ISSN: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- GIAYETTO, O.; MORLA, F. D.: Capítulo 12: Calibración de modelos en cultivos agrícolas, en Bases conceptuales y metodológicas para el ordenamiento territorial en el medio rural, Editorial: Libroclíc Ediciones, 2013, ISBN: 978-987-29233-0-3, 281-292, Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Federico_Morla/publication
- GIRALT, E.P.: "Régimen de riego del cultivo del frijol negro (*P. vulgaris*)", *Ciencia y Técnica en la Agricultura, Riego y Drenaje*, 2(1), 1979, ISSN: 0138-8487.

- González *et al.*: Calibración y análisis de sensibilidad del modelo *Aquacrop* para frijol en suelo Ferralítico Rojo compactado
- GONZALÉZ, 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.
- GONZALÉZ, R.F.; CISNEROS, Z.E.; HERRERA, P.J.; LÓPEZ, T.; CID, L.G.: “Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max* L) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(1): 3-13, 2019, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- GONZÁLEZ, R.F.; DELGADO, R.; DÍAZ, Y.; HERRERA, J.; LÓPEZ, 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.
- GORMLEY, H.L.L.; SINCLAIR, L.F.: “Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Latina”, *Agroforestaría en las Américas*, (10): 103-108, 2003.
- HEINEMANN, A.B.; RAMIREZ, V.J.; SOUZA, T.P.L.O.; DIDONET, A.D.; DI STEFANO, J.G.; BOOTE, K.J.; JARVIS, A.: “Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil”, *Agricultural and Forest Meteorology*, (225): 57–74, 2016, ISSN: 0168-1923, e-ISSN: 1873-2240.
- 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.
- HERRERA, P. J.; MARTÍNEZ, E.; GIRALT, E.: “Respuesta del frijol al riego en suelos loam arenosos con horizontes gleyzados”, *Revista Ciencia y Técnica en la Agricultura. Serie Riego y Drenaje*, 11(2): 7-19, 1988, ISSN: 0138-8487.
- HSIAO, T.C.; HENG, L.K.; STEDUTO, P.; ROJAS, L.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: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- IIG- MINAG: Guía técnica para el cultivo del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), Inst. Instituto de Investigaciones de Granos, Editora Agroecológica, Bauta, Artemisa, Cuba, 2013.
- INSTITUTO DE SUELOS: Clasificación genética de los Suelos de Cuba. Editorial Academia. La Habana, 28p. 1980.
- LÓPEZ, G.; HERRERA, P.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*, XIX(4): 22-26, 1998.
- MERINO, J. D.: *Caracterización morfofisiológica y agronómica de cultivares de soya en siembra de invierno en suelo pardo con carbonato*. 65pp. Tesis de diploma. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Villa Clara, Cuba, 2006.
- MUÑOZ, C.G.; ALLEN, R.G.; WESTERMANN, D.T.; WRIGHT, J.L.; SING, S.P.: “Water use efficiency among dry beans landraces and cultivars in drought stressed and non-stressed environments”, *Euphytica*, (155): 393-402, 2007, ISSN: 0014-2336.
- 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, 2009, ISSN: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, Ed. Estudio FAO Riego y Drenaje 66, Rome, Italy, 510 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4.
- RAES, D.; GEERTS, S.; KIPKORIR, E.; WELLENS, V.; SAHLI, D. A.: “Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model”, *Agricultural Water Management*, 81: 335–357, 2006, ISSN: 0378-3774.
- RUIZ, P.V.; SIFUENTES, I.E.; OJEDA, B.W.; MACIAS, C.J.: “Adecuación de fechas de siembra por variabilidad climática en frijol (*phaseolus vulgaris*) mediante AQUACROP-FAO, en Sinaloa”, En: *IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII Aguascalientes*, Aguascalientes, México, 2018.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E.: “AquaCrop-the FAO crop model to simulated yield response to water: I. Concepts and underlying principles”, *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437, 2009, ISSN: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, Ed. Estudio FAO Riego y Drenaje 66, Rome, Italy, 510 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4.
- THORNTON: *How does climate change alters agricultural strategies to support food security*, [en línea], Inst. International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2014, Disponible en: <http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/ifpridp01340.pdf>, [Consulta: 20 de mayo de 2014].
- WANI, S.; ALBRIZIO, R.; VAJJA, N.: “Sorghum. Crop yield response to water”, En: *Irrigation and drainage paper number, vol. 66.*, Ed. FAO, Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E, Raes, D. ed., Rome, Italy, pp. 144–151, 2012.

Felicit González-Robaina Investigadora Titular y Profesora Auxiliar, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Dario López-Vargas, graduado de Ingeniero Hidráulico (2019) en la Universidad Tecnológica de La Habana, Marianao, La Habana, Cuba, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Enrique Cisneros-Zayas, Investigador y Profesor Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba, e-mail: dptorigol@iagric.cu

Julián Herrera-Puebla, Investigador y Profesor Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba, e-mail: direccioninvest1@iagric.cu

Greco Cid-Lazo. Investigador y Profesor Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba, e-mail: dptoambientel@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.