



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Evaluación del modelo *AquaCrop* en condiciones de riego óptimo y deficitario en *Phaseolus vulgaris*

Evaluation of *AquaCrop* model for optimal and deficit irrigation conditions on *Phaseolus vulgaris*

Norge Tornés Olivera¹ , Yarisbel Gómez Masjuan¹ , Toni Boicet Fabrè¹ , Oscar Brown Manrique² 

¹ Departamento de Producción Agrícola, Universidad de Granma, Carretera a Manzanillo km 17,5, Bayamo, Granma, Cuba

² Centro de Estudios Hidrotécnicos, Universidad Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido: 11/09/2019
Aceptado: 06/03/2021

CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no existir conflictos de intereses.

CORRESPONDENCIA

Norge Tornés Olivera
ntorneso@udg.co.cu



RESUMEN

La investigación se desarrolló durante los meses de enero hasta abril de 2017 con el objetivo de evaluar el comportamiento del modelo *AquaCrop* en la simulación del rendimiento agrícola del cultivo del frijol común en condiciones variables de disponibilidad hídrica. El área de investigación pertenece a la Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS) Clemente Ramos, municipio Bayamo, provincia Granma. La misma se encuentra ubicada a los 20° 22' 57,1" de Latitud N y a 76° 38' 16,4" Longitud O con una altura de 52, 50 msnm. Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado, con tres variantes y tres repeticiones. Las variantes experimentales evaluadas fueron: marco de plantación de 0,07*0,7 m y 100 % de la demanda evapotranspirativa, marco de plantación de 0,07*0,7 m y 80 % de la demanda evapotranspirativa, marco de plantación de 0,05*0,55 m y 100 % de la demanda evapotranspirativa. El modelo simuló aceptablemente la cobertura foliar al lograrse valores de R² (0,94; 0,94 y 0,92) y valores de *d* (0,87; 0,77 y 0,73) para las tres variantes, mientras que los valores logrados en la simulación de biomasa seca aérea en condiciones de limitación, solo fueron aceptables el R² 0,99 y *d* 0,72 en la variante1. El rendimiento agrícola fue simulado de forma aceptable al lograrse R² 98,88 y EAM 0,044.

Palabras clave: disponibilidad hídrica, frijol común, rendimiento agrícola, simulación

ABSTRACT

The investigation was developed during the months of January until April of 2017, with the objective of evaluating the behavior of the pattern *AquaCrop* in the simulation of the agricultural yield of the dry bean crop under variables conditions of availability water. The investigation area belongs to the Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS) Clemente Ramos, municipality of Bayamo, Granma province, which is located at the 20° 22' 57,1" of Latitude N and at 76° 38' 16,4" Longitude O, with a height of 52,50 msnm. A randomized experiment design was utilized, with three variants and three repetitions. The experimental variants were, mark of plantation of 0,07*0,7 m and 100 % of the evapotranspiration demand, mark of plantation of 0,07*0,7 m and 80 % of the evapotranspiration demand, mark of plantation of 0,05*0,55 m and 100 % of the evapotranspiration demand. The model simulated the canopy cover acceptably, when being achieved values of R^2 (0,94; 0,94 and 0,92) and values of d (0,87; 0,77 and 0,73) for the three variants, while the values achieved in the simulation of air dry biomass under limitation conditions, alone they were acceptable the R^2 0,99 and d 0,72 in the variant 1. The agricultural yield was simulated from an acceptable way when being achieved R^2 98,88 and EAM 0,044.

Keywords: availability water, common bean, agricultural yield, simulation

INTRODUCCIÓN

El agua es el factor que limita la producción en muchas partes del mundo donde las precipitaciones no son abundantes. Con los incrementos recientes en las demandas de productos agrícolas y las sucesivas crisis alimentarias en los países subdesarrollados, la necesidad de mejorar el uso del agua en la agricultura es una prioridad (Raes *et al.* (2018). Como parte de sus esfuerzos hacia estos objetivos, Steduto *et al.* (2009) desarrollaron el modelo llamado *AquaCrop* y lo definen como el modelo agronómico de la FAO, diseñado para: simular la biomasa de varios tipos de cultivos herbáceos en respuesta al uso del agua y el rendimiento agrícola esperado en función de una menor disponibilidad de agua, en un determinado ambiente y en una región particular.

El modelo *AquaCrop* ha sido evaluado por varios autores. Abedinpour *et al.* (2012) evaluaron el modelo en el cultivo del maíz en condiciones semiáridas y encontraron valores satisfactorios para los indicadores evaluados. Abi *et al.* (2014) encontraron exactitud entre los valores simulados y observados, en los cultivos de soya y girasol para diferentes épocas de siembra y regímenes hídricos. Amiri *et al.* (2014); Andarzian *et al.* (2011); Anjum *et al.* (2014) al evaluar la cobertura foliar en los cultivos de arroz y trigo, también encontraron

evaluaciones satisfactorias.

En Cuba hay pocos trabajos publicados sobre el uso de *AquaCrop*, encontrándose los resultados de González *et al.* (2018), quienes evaluaron la capacidad predictiva del modelo bajo la condición de estrés hídrico en el cultivo de sorgo en suelo Ferralítico Rojo. Los resultados obtenidos por los autores antes citado, demostraron que las predicciones del rendimiento del grano, el estrés hídrico y la cobertura foliar, fueron buenas. También se reportan los resultados de Tornés *et al.* (2016), quienes demostraron la capacidad de este modelo simular de forma satisfactoria las variables: cobertura foliar, biomasa seca aérea y contenido total de humedad.

Uno de los cultivos priorizados en nuestro país es el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), durante su producción se presentan problemas de: variabilidad climática (déficit de precipitaciones y aumentos de temperatura), incidencia de plagas y enfermedades, uso del agua de riego, entre otros. Debido a lo anterior es necesario que el país pueda disponer de herramientas que le sirvan de ayuda a la toma de decisiones para lograr el menor costo económico y ambiental. El trabajo tiene como objetivo evaluar la exactitud del modelo *AquaCrop* en la simulación del rendimiento del cultivo del frijol común en condiciones variables de disponibilidad hídrica y población.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La investigación se desarrolló desde enero hasta abril del año 2017. El área de investigación pertenece a la Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS) Clemente Ramos, municipio Bayamo, provincia Granma, la cual se encuentra ubicada a los 20° 22' 57,1" de Latitud N y a 76° 38' 16,4" Longitud O con una altura de 52,50 msnm.

Características del suelo

El suelo se clasificó como del tipo Vertisol pélico y del subtipo Vertisol pélico calcico según la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández *et al.*, 2015). La profundidad efectiva es de 50 cm por lo que clasifica como poco profundo, de pendiente llana. Con la relación a la textura predomina la arcilla montmorillonita (> 75 %). El contenido de humedad a la capacidad de campo es equivalente al 43 % mss. El punto de marchitez permanente se determinó mediante el uso de la fórmula empírica la cual se deriva de conocer el valor de la capacidad de campo (Cisneros, 2003):

$$PMP = \frac{CC}{1,84} \quad (1)$$

Donde: PMP es el punto de marchitez permanente, % mss; CC el contenido de humedad a la capacidad de campo, % mss.

Características del clima

Los datos de clima se tomaron de la Estación Agrometeorológica de Babiney, ubicada, a los 20° 30' 41,5" de latitud y a 76° 29' 34,7" longitud y 58,50 msnm. El clima es tropical, el promedio de precipitaciones durante el periodo de enero abril fue de 158,93 mm. Las temperaturas medias oscilaron entre 22,7 °C en el mes de enero y 27 °C en el mes de abril. Con diferencia entre mínimas de 16,5 °C en el mes de enero y máximas de 33,1 °C en el mes de abril. Los valores e humedad relativa variaron entre el 81 % (enero) y el 77 % (abril). La velocidad del viento osciló entre 4,6 m s⁻¹ (enero) y el 6 m s⁻¹ (abril).

Cálculo de la evapotranspiración

Para la determinación de las necesidades hídricas se utilizaron datos climáticos de una serie de 10 años procedentes de la Estación Agrometeorológica Babiney. Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), se empleó el software ET_o calculator versión 3.2, el cual utiliza los procedimientos descritos por Allen *et al.* (1998) y después se exportaron hacia el modelo *AquaCrop* versión 6.

El cálculo del intervalo entre riegos se realizó dividiendo la dosis de riego entre evapotranspiración promedio decenal, según la ecuación siguiente:

$$IR = \frac{Dr}{ET_{md}} \quad (2)$$

Donde: IR es el intervalo entre riegos, d; Dr la dosis de riego, mm; ET_{md} la evapotranspiración media decenal, mm

Diseño experimental

Se utilizó el diseño completamente aleatorizado con tres variantes experimentales y tres repeticiones. Para lo cual se utilizaron parcelas de 4 m² con un espaciamiento entre las mismas de 0,50 m. El cultivo estudiado fue el frijol común, variedad INIVIT punti blanco. Este cultivar tiene hábito de crecimiento tipo I, el ciclo vegetativo varía entre 67 y 70 días y el rendimiento es de 1,21 t ha⁻¹. La siembra se realizó con dos hileras en cada parcela.

Las variantes experimentales utilizadas se describen a continuación:

Variante 1: 0,07 m entre plantas y 0,70 m entre hileras (20 plantas por m²). 100 % de satisfacción de la demanda hídrica.

Variante 2: 0,07 m entre plantas y 0,70 m entre hileras (20 plantas por m²). 80 % de satisfacción de la demanda hídrica.

Variante 3: 0,05 m entre plantas y 0,55 m entre hileras (36 plantas por m²). 70 % de satisfacción de la demanda hídrica.

La satisfacción de la demanda hídrica por variante se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Variantes experimentales utilizadas en la investigación

Variantes	Período (d)		
	0-30	31-45	46-65
V1-100 %ET	6,60 mm-4 d	18,00 mm-4 d	7,00 mm-4 d
V2-80 %ET	5,28 mm-4 d	14,40 mm-4 d	5,60 mm-4 d
V3-100 %ET	6,60 mm-4 d	18,00 mm-4 d	7,00 mm-4 d

Evaluación y validación del modelo *AquaCrop*

Los parámetros del suelo utilizados en la investigación se muestran en la Tabla 2.

Parametrización del modelo

La parametrización es un nivel de ajuste de los parámetros específicos del modelo mayor que la calibración, aunque los dos son usados indistintamente en algunas literaturas. Por lo que respecta a *AquaCrop*, no hay parámetros predeterminados para el frijol común. En la

tabla 3 se presentan los parámetros.

El porcentaje de cobertura foliar se estimó acorde con la metodología propuesta por Hsiao *et al.* (2009). Se ubicó una malla de un metro cuadrado con cuadrículas de 0,10x0,10 m sobre la cobertura foliar y se tomó una foto en plano vertical con cámara digital, marca Kodak, de 12 MP con un lente de 35 mm. Las fotos se tomaron con una frecuencia de 10 días y se procesaron con el *software* ImageTool para *Windows*, versión 3 (Wilcox *et al.*, 2002). Para la

Tabla 2. Propiedades del suelo del área de investigación

Propiedades	Valor	Unidad	Método
Densidad aparente	1,4	g cm ⁻²	(TLSFG)
Conductividad hidráulica	50	mm d ⁻¹	(TLSFG)
Saturación	52	V (%)	(TLSFG)
Capacidad de campo (CC)	43	V (%)	(TLSFG)
Punto de marchitez (PMP)	23,36	V (%)	PMP= CC/1.84 (Cisneros, 2003)
Agua disponible (ADT)	196,4	mm m ⁻¹	ADT=10*(CC-PMP)
Fracción de agotamiento permisible	0,5		Criterio de Allen <i>et al.</i> (1998)

TLSFG: Tomado del laboratorio de suelos de la Dirección Provincial de Suelos y Fertilizantes de Granma

Tabla 3. Parámetros de entrada del modelo *AquaCrop* para la simulación

Parámetro	V1	V2	V3
CF (%)	35,60	27,30	33,60
IF (d)	30	29	30
FP	26/01/2017	26/01/2017	26/01/2017
DP (planta m ⁻²)	20	20	26
DG	8	8	8
DF (d)	9	8	9
DM (d)	61	60	61
IS (d)	65	64	65
PER (cm)	38,9	41,2	38,7
B (t ha ⁻¹)	2,83	1,98	3,7
R (t ha ⁻¹)	0,833	0,718	0,915

CF significa cobertura foliar máxima; IF inicio de la floración; FP fecha de plantación; DP densidad de plantación; DG días a la germinación; DF significa duración de la floración; DM días a la maduración; IS inicio de la senescencia; PER profundidad efectiva máxima de las raíces; B biomasa; R rendimiento

progresión la biomasa aérea se 10 plantas cada 10 días y se secaron en estufa a 70 °C hasta peso constante.

Índices estadísticos utilizados en la evaluación del modelo

La evaluación de la exactitud del modelo se realizó a partir datos observados y simulados mediante un gráfico de dispersión. Asimismo, se utilizaron cinco índices estadísticos (3, 4, 5, 6, 7):

$$R^2 = \frac{Scr}{Sct} \times 100 \quad (3)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{M}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - S_i)^2}{N}} \quad (5)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)} \quad (6)$$

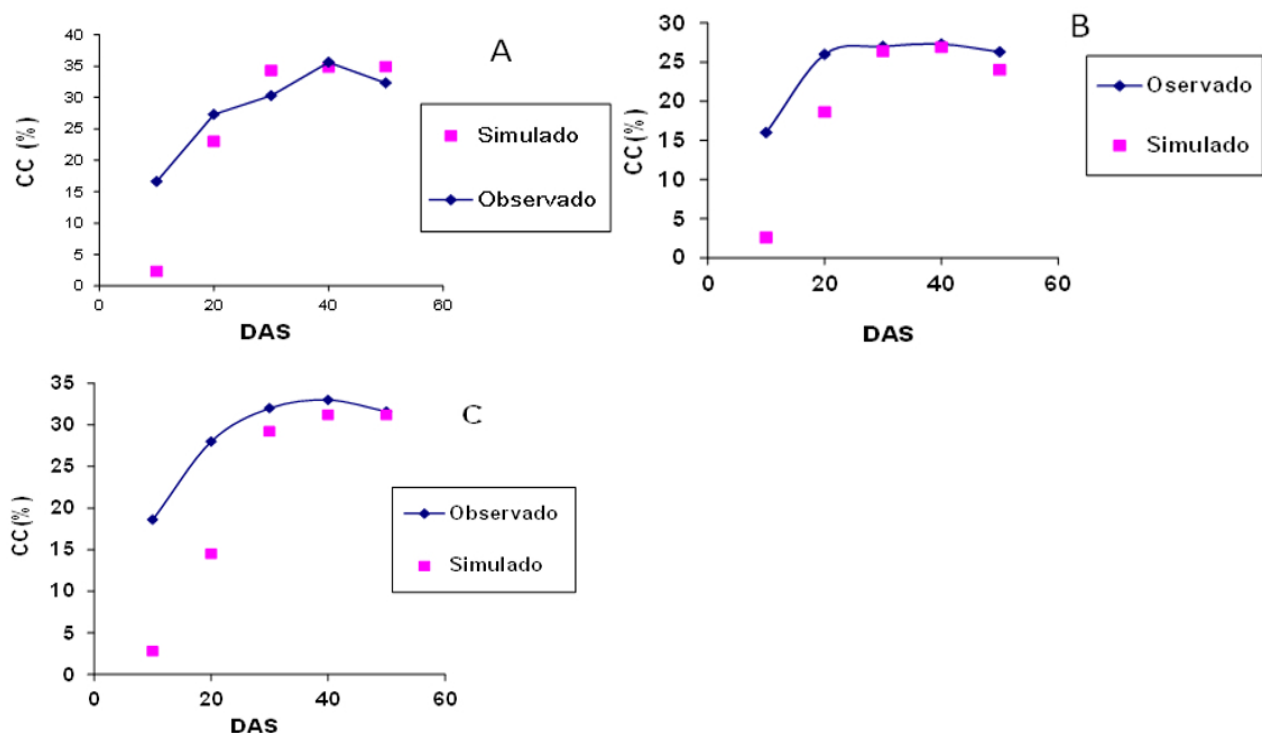
$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - M_i| \quad (7)$$

Donde: R^2 es el coeficiente de determinación, %; Scr la suma de cuadrados debido a la regresión; Sct la suma total de cuadrados; EF es la eficiencia del modelo; M_i los valores medidos; S_i los valores simulados; \bar{M} la media de los valores medidos; $NRMSE$ el error cuadrático medio normalizado; N es el número de observaciones; EAM el error absoluto promedio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Progresión de la cobertura foliar

Al analizar la progresión de la cobertura en V1 (Figura 1A) se encontró que el modelo la subestimó en los primeros 20 días y después tuvo como tendencia la sobreestimación. El modelo no estimó correctamente la reducción de la cobertura foliar después de iniciada la senescencia al considerar un incremento de la cobertura (50 días después de la siembra). En V2 (Figura 1B) se observó que el modelo subestimó la progresión de la cobertura foliar de forma marcada hasta los 20 días, en los días posteriores se observó exactitud en la simulación de la progresión de la cobertura foliar. Respecto a V3 (Figura 1C) se aprecia que el modelo tuvo como tendencia la subestimación de la progresión de



V1: (A) marco de plantación de 0,07*0,7 m y 100 % de la demanda evapotranspirativa; V2: (B) marco de plantación de 0,07*0,7 m y 80 % de la demanda evapotranspirativa; V3: (C) marco de plantación de 0,05*0,55 m y 70 % de la demanda evapotranspirativa

Figura 1. Progresión de la cobertura foliar observada y simulada

la cobertura foliar durante todo el ciclo evaluado, con igual tendencia a aumentar la exactitud en los últimos días del ciclo evaluado.

De forma general el modelo subestimó la progresión de la cobertura foliar durante los primeros 20 días y aumenta la exactitud cerca de los 40 días. La correcta simulación de CC es central para la representación de *AquaCrop* porque afecta la tasa transpiratoria y, en consecuencia, la acumulación de biomasa (Farahani *et al.*, 2009).

Estas diferencias entre los valores medidos y simulados están dadas fundamentalmente por el coeficiente de crecimiento foliar, el coeficiente de reducción del follaje, los umbrales superiores e inferiores de estrés hídrico utilizados por el modelo que determinan la velocidad de crecimiento y la caída prematura de las hojas.

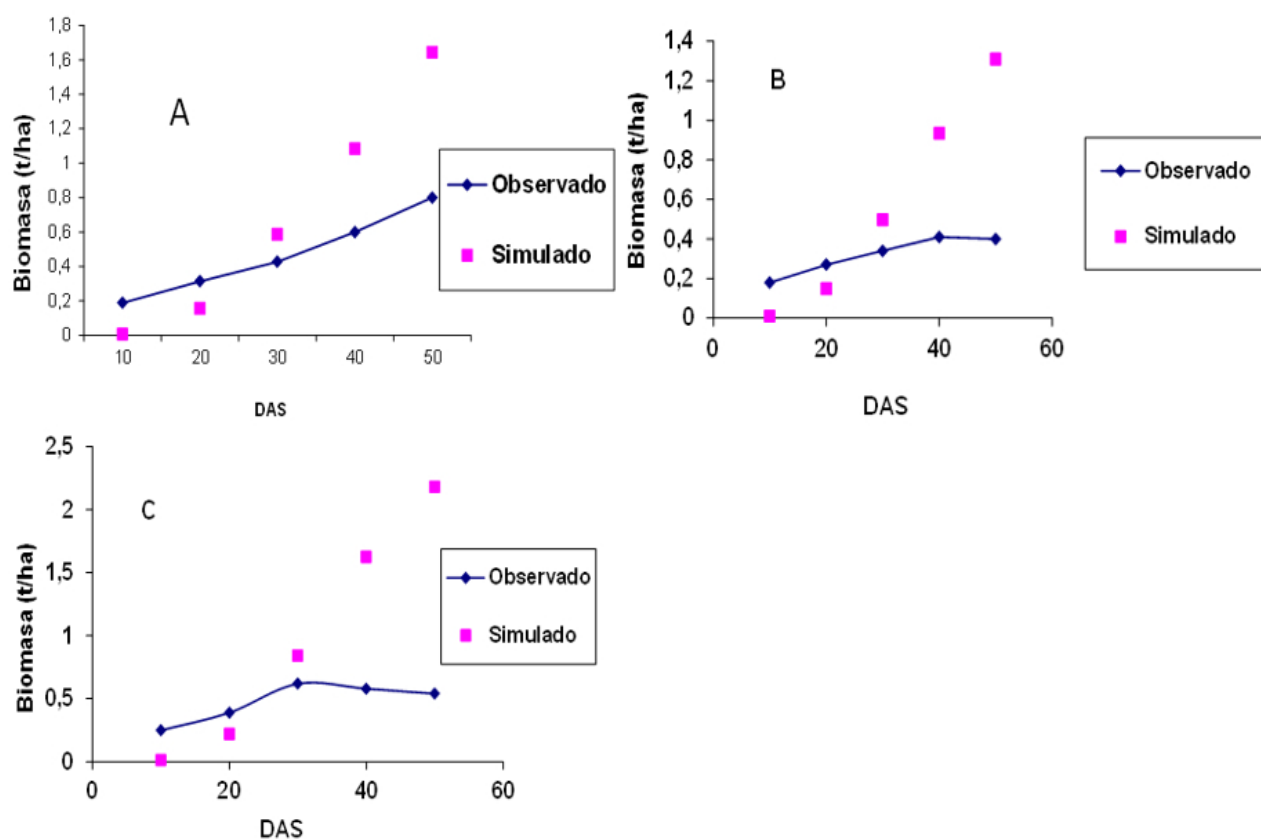
Karunaratne *et al.* (2011) encontraron que el modelo subestimó la progresión de la cobertura foliar en el cultivo de maní, estudiado con diferentes variantes de riego. Heng *et al.* (2009) validaron *AquaCrop* en la simulación del cultivo

del maíz cultivado en un amplio rango de condiciones ambientales, irrigadas y en secano, con estreses hídricos en diferentes etapas de crecimiento. Los autores encontraron buena concordancia de modelo simulando CC, en condiciones óptimas de riego. El modelo fue menos satisfactorio en la simulación en los tratamientos que tuvieron un estrés severo, especialmente cuando el estrés ocurrió durante la senescencia.

Farahani *et al.* (2009) calibraron el modelo *AquaCrop* para el cultivo del algodón en ambientes de riego óptimo y deficitario en el norte de Siria, los tratamientos fueron riego localizado (goteo), con cuatro niveles de riego correspondientes a 40, 60, 80, y 100 % de las necesidades hídricas del cultivo. El ajuste entre los valores de cobertura foliar observados y simulados fue bueno en todos los casos.

Progresión de la biomasa seca aérea

Al analizar V1 se notó que el modelo subestima en los primeros 20 días la producción



V1: (A) marco de plantación de 0,07*0,7 m y 100 % de la demanda evapotranspirativa; V2: (B) marco de plantación de 0,07*0,7 m y 80 % de la demanda evapotranspirativa; V3: (C) marco de plantación de 0,05*0,55 m y 70 % de la demanda evapotranspirativa

Figura 2. Progresión de la biomasa seca aérea observada y simulada

y a partir de los 30 la sobreestima con una diferencia creciente (Figura 2 A). En V2, se encontró que el modelo tiende a sobreestimar la progresión de la biomasa aérea y de forma marcada después de los 40 días, en los días anteriores que existe exactitud en la simulación de la progresión (Figura 2 B). El comportamiento de V3 (Figura 2 C), es similar a los anteriormente discutidos. A partir del análisis anterior se deduce que el modelo no simula adecuadamente la restricción hídrica (Figura 2 C). El modelo sobreestima la biomasa sin discriminar entre el suministro hídrico óptimo o deficitario o nivel de población.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Nazeer y Ali (2012) usando el cultivo de la cebolla como un cultivo de prueba y cuatro variantes de riego 100, 80, 60 y 40 % de las necesidades hídricas del cultivo, encontraron que el modelo mostró sobreestimación para todos los tratamientos, mientras subestimó la productividad del agua sin discriminar entre las condiciones de estrés impuestas; y con los obtenidos por Hsiao *et al.* (2009), quienes reportaron que el modelo no es capaz de predecir con exactitud en las condiciones de estrés hídricas severa debido a las diferentes etapas de desarrollo y características de humedad del suelo.

Validación del modelo mediante indicadores estadísticos

De forma general se considera que simuló las fases de desarrollo bien al tener un buen valor el coeficiente de determinación $R^2=0,94$ para V1; $R^2=0,94$ para V2 y $R^2=0,92$ para V3 (Tabla 4).

Tabla 4. Indicadores estadísticos de la cobertura foliar

Descripción	CC		
	V1	V2	V3
R^2	0,94	0,94	0,92
NRMSE (%)	24,7	28,3	32,8
E	-0,17	-1,61	-2,06
d	0,87	0,77	0,73

Karunaratne *et al.* (2011) encontró valores ($R^2= 0,88$) en la simulación de la cobertura foliar en el cultivo de maní, estudiado con

diferentes variantes de riego lo que sugiere que el modelo explicó exitosamente esta variable.

Los valores de NRMSE Fueron de 24,7; 28,3 y 32 % para V1, V2 y V3, respectivamente, por lo que se considera que la simulación es aceptable según el criterio de Steduto *et al.* (2009). Estos valores al compáralos con los obtenidos en la parametrización del modelo *AquaCrop* para otros cultivos son en su totalidad superiores. Hsiao *et al.* (2009) reportaron valores del NRMSE entre 4,8-11 % obtenidos para algodón. Por otra parte, Farahani *et al.* (2009) lograron NRMSE de 9,5 %. Steduto *et al.* (2009) reportaron NRMSE de 8,4 % para canola. Karunaratne *et al.* (2011) calificaron de aceptable el NRMSE (14,75 %) estudiando el cultivo del maní con diferentes variantes de riego.

La eficiencia del modelo no se considera buena, debido a que en las variantes no se logra un valor inferior a 0,2 según el criterio de Nashy Sutcliffe (1970). Al analizar el d se puede apreciar que todos los valores están próximos a 1, lo que sugiere que d tiene un valor alto según el criterio de Steduto *et al.* (2009).

Los indicadores estadísticos de la progresión de la biomasa se presentan en la Tabla 5. El modelo tuvo mayor exactitud en la simulación de V1, lo anterior se confirma con los valores obtenidos de los indicadores estadísticos.

Tabla 5. Indicadores estadísticos de la biomasa

Descripción	B		
	V1	V2	V3
R^2	0,99	0,83	0,92
NRMSE (%)	40	45	50
E	-3,48	-30,7	-40,64
d	0,72	0,39	0,29

Los valores de los indicadores estadísticos para la biomasa tienen un comportamiento diferente con relación a la cobertura foliar. De forma general se puede decir que el modelo no simuló de forma aceptable la producción de biomasa y que los niveles de abastecimiento hídrico, así como las densidades son factores que introducen algún sesgo en la simulación.

Karunaratne *et al.* (2011) estudiando el cultivo del maní con diferentes regímenes de riego

encontró que el modelo explicó exitosamente la producción de biomasa con un

$R^2(0,78)$. Araya *et al.* (2010), validó el modelo para el cultivo de la cebada con riego suplementario después de floración (0, 2, 4, 6, 8 riegos), con una densidad de población de aproximadamente 155 plantas por m². Los resultados mostraron que para la biomasa aérea $R^2 > 0,95$.

Los rendimientos observados y simulados mostraron un R^2 (98,88 %), mientras que la biomasa mostró un R^2 (92,5 %) (Tabla 6). El EAM para el rendimiento fue de 0,044 t ha⁻¹; para la biomasa fue de 0,27 t ha⁻¹. Es importante resaltar que este modelo estima el rendimiento a partir del producto del índice cosecha por la biomasa, lo que probablemente justifique el menor sesgo en la predicción del rendimiento.

Heng *et al.* (2009) mostraron que *AquaCrop* predice el rendimiento muy bien en condiciones de riego óptimo o estrés moderado, lo cual es similar a los resultados de esta investigación. Karunaratne *et al.* (2011) para el cultivo del maní con diferentes regímenes de riego consideró satisfactoria la simulación del modelo al lograr un R^2 de 0,72 y NRMSE de 0,36 ha⁻¹.

La variación de la calidad y cantidad de radiación solar pueden tener efectos indirectos en la simulación de *AquaCrop* mediante los cálculos de ETo. La biomasa final difiere entre las diferentes variantes de riego; sin embargo, se observó que el rendimiento del grano fue bien simulado en condiciones óptimas de riego, mientras que estuvo fuertemente subestimado en condiciones de estrés.

Otros científicos (Heng *et al.* 2009; Araya *et al.*, 2010) también reportaron que el rendimiento máximo simulado por *AquaCrop*

fue subestimado en condiciones de estrés.

CONCLUSIONES

1. El modelo simuló aceptablemente la cobertura foliar al lograrse valores del coeficiente de determinación superiores a 0,92 para las tres variantes evaluadas.
2. El modelo no simuló adecuadamente la biomasa, al lograrse valores aceptables solamente en la variante 1.
3. El rendimiento fue simulado de forma aceptable al lograrse avalar por altos valores del coeficiente de determinación y bajos del error absoluto promedio.
4. El modelo no simuló adecuadamente la progresión de la biomasa, y mostró diferencias de los indicadores entre las variantes analizadas.

CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

Norge Tornés Olivera: Conceptualizó y formuló los objetivos generales de la investigación. Interpretó los resultados del análisis estadístico, redactó el borrador del manuscrito y rectificó los señalamientos realizados al mismo por los árbitros y Consejo Editorial.

Yarisbel Gómez Masjuan: Responsable de la conservación de los datos y anotaciones tomadas en el transcurso de la investigación; contribuyó en la preparación, creación y presentación del trabajo publicado.

Toni Boicet Fabrè: responsable de proveer los materiales y recursos necesarios para la ejecución de la investigación.

Tabla 6. Valores del rendimiento y la biomasa observados y simulados

Descripción	R (t ha ⁻¹)		B (t ha ⁻¹)	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado
V1	0,833	0,810	2,83	2,84
V2	0,718	0,487	2,27	1,431
V3	0,915	1,014	3,7	2,692
R ² (%)	98,88		92,5	
EAM (t ha ⁻¹)	0,044		0,27	

Oscar Brown Manrique: Contribuyó en la aplicación de las técnicas estadísticas utilizadas para analizar o sintetizar los datos de estudio obtenidos. Hizo la revisión crítica del borrador y recomendó modificaciones, supresiones y adiciones en el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- ABEDINPOUR, M., SARANGI, A., RAJPUT, T. B. S., *et al.* 2012. Performance evaluation of *AquaCrop* model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110: 55-66.
- ABI, M. T., ALBRIZIOB, R., NANGIAC, V., *et al.* 2014. Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with *AquaCrop*. *International Journal of Plant Production*, 8(4): 457-482.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. y SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, 300 pp. *Irrigation and Drainage Paper*, n. 56. FAO, Rome, Italy.
- AMIRI, E., REZAEI, M., EYSHI, R. y BANNAYAN, M. 2014. Evaluation of Ceres-Rice, *AquaCrop* and Oryza 2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 37:1749-1769.
- ANDARZIAN, B., BANNAYAN, M., STEDUTO, P., *et al.* 2011. Validation and testing of the *AquaCrop* model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100:1-8.
- ANJUM, M., YANJUN, S., RUZICA, S., *et al.* 2014. Evaluation of the FAO *AquaCrop* model for winter wheat on the north China plain under deficit irrigation from field experiment to de regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135: 61- 72.
- ARAYA, A., HABTU, S., MELES, H. K., *et al.* 2010. GTeste of *AquaCrop* model in simulating biomass and yield of water deficit and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural and Water Management*, 97: 1838-1846.
- CISNEROS, R. 2003. Apuntes de la materia de Riego y Drenaje. 1ra ed. Centro de Investigación y Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luís, Potosí, Bolivia, p. 164.
- FARAHANI, H. J., IZZI, G. and OWEIS, T. Y. 2009. Parameterization and evaluation of the *AquaCrop* model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101: 469-476.
- GONZÁLEZ, R. F., DELGADO, A. R., DÍAZ, P. Y., *et al.* 2018. Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo. *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(1):3-12.
- HENG, L. K., HSIAO, T. C., EVETT, S., *et al.* 2009. Validating the FAO *AquaCrop* model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101: 488-498.
- HERNÁNDEZ, A., PÉREZ, J., BOSCH, D. y CASTRO, N. 2015. Clasificación de los suelos de Cuba 2015. Ediciones INCA, Mayabeque, Cuba, 93 pp.
- HSIAO, T. C., HENG, L. K., STEDUTO, P., ROJAS, L. B., *et al.* 2009. *AquaCrop*-the FAO crop model to simulate yield response to water III parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101: 448-459.
- KARUNARATNE, A. S., AZAM-ALI, S. N., IZZI, G. y STEDUTO, P. 2011. Calibration and validation of *AquaCrop* model for irrigated and water deficient bambara groundnut. *Exper. Agric.*, 47: 509-527.
- NASH, J. E. y SUTCLIFFE, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10:282-290.
- NAZEER, M. and HUSSAIN, A.. 2012. Modeling the response of onion crop to

deficit irrigation. *Journal of Agricultural Technology*, 8(1): 393-400.

RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T., FERERES, E. 2018. Reference Manual *AquaCrop* 6.0. 150pp., FAO, Roma. En Línea: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>
Accedido el 13 de marzo de 2018.

STEDUTO, P., HSIAO, T.C., RAES, D. and FERERES, E. 2009. *AquaCrop*-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy*

Journal, 101(3): 426-437.

TORNÉS, O. N., BROWN, M. O., GÓMEZ, M. Y., GUERRERO, G. A. 2016. Evaluation of *AquaCrop* model in crop dry bean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3): 23-30.

WILCOX, D., DOVE. B. y D. MACDAVID. 2002. ImageTool for Windows version 3.00. University of Texas Health Science Center, San Antonio.



Artículo de libre acceso bajo los términos de una *Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional*. Se permite, sin restricciones, el uso, distribución, traducción y reproducción del documento, siempre que la obra sea debidamente citada.