



Evaluación del rendimiento y la productividad del agua en soya (*Glycine max*) con Aquacrop*

Assessment yield and water productivity in soybean (*Glycine max*) with Aquacrop

Dania Zúñiga-Herrera¹, Néstor Felipe Chaves-Barrantes², Marco Vinicio Gutiérrez-Soto³,
Mayela Monge-Muñoz⁴, Cristina Chinchilla-Soto⁴

* Recepción: 19 de mayo, 2025. Aceptación: 29 de julio, 2025. Parte del Proyecto de Investigación 802-B6-604 Estimación de la Eficiencia en el uso del agua (EUA) de una estrategia de mitigación-adaptación al cambio climático, para la alimentación de ganado de doble propósito en la zona norte de Costa Rica, financiado por la Universidad de Costa Rica, fondo de Estímulo para Reinserción.

¹ Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, Montes de Oca, Costa Rica. daniah967@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0000-4881-4749>).

² Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Programa de Leguminosas, Alajuela, Costa Rica. nestor.chaves@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-8465-8130>).

³ Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Programa de Ecofisiología de Plantas Tropicales, Alajuela, Costa Rica. marcovgutierrez82@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-8264-0129>).

⁴ Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, Montes de Oca, Costa Rica. mayela.monge@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-1176-1086>); cristina.chinchilla@ucr.ac.cr (autora para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-6507-0419>).

Resumen

Introducción. Los modelos de simulación son una herramienta para estudiar el comportamiento de los cultivos bajo distintas condiciones climáticas, hídricas y prácticas de manejo agronómico. **Objetivo.** Evaluar el modelo AquaCrop en la estimación del rendimiento y la productividad del agua en el cultivo de la soya variedad CIGRAS-06. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, en Alajuela, Costa Rica del 6 de junio al 23 de octubre del 2018. Se utilizó el modelo AquaCrop para simular el desarrollo y rendimiento del cultivo de soya. Se compararon datos simulados de cobertura del dosel vegetal, producción de biomasa y rendimiento, contra datos experimentales de una parcela sembrada con soya variedad CIGRAS-06. Se utilizaron parámetros de suelo medidos en campo y generados mediante ecuaciones de pedrotransferencia. **Resultados** Las predicciones del rendimiento, biomasa total y cobertura fueron buenas (similitud ($d \geq 0,97$), pero las predicciones de cobertura foliar durante el inicio del ciclo del cultivo son susceptibles de mejora. Las diferencias en los dos tipos parámetros de suelo utilizadas, no afectaron significativamente la simulación final. **Conclusiones.** AquaCrop permitió simular el rendimiento de la soya, la biomasa y la cobertura foliar satisfactoriamente. La simulación de la productividad del agua fue superior a otros valores reportados en la literatura.

Palabras clave: biomasa, cobertura de dosel, conductividad hidráulica, simulación, sensibilidad, uso consuntivo.

Abstract

Introduction. Simulation models are a tool to study the behavior of crops under different climatic and water conditions and agronomic management practices. **Objective.** To evaluate the AquaCrop model for yield and water



productivity in soybean var. CIGRAS-06. **Materials and methods.** The study was carried out at the Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno of the University of Costa Rica, in Alajuela, Costa Rica from June 6th to October 23rd 2018. The AquaCrop v 7.1 model was used to simulate the development of soybean cultivation. Simulated data of plant canopy cover, biomass production and yield were compared against experimental data from a plot of soybean variety CIGRAS-06. Soil parameters measured in the field and generated using pedotransfer equations were used. **Results.** The predictions of yield, total biomass, and coverage were good (similarity values (d) ≥ 0.97), but the predictions of leaf coverage during the beginning of the crop cycle are should be improvement. Differences observed in the two types of soil parameters used, did not significantly affect the final simulation. **Conclusions.** Overall, modeling with AquaCrop successfully simulated soybean yield, biomass, and leaf coverage. The simulation of water productivity was higher than other values reported in the literature.

Keywords: biomass, canopy cover, hydraulic conductivity, simulation, sensitivity, consumptive use, climate variability.

Introducción

Se proyecta que el impacto del cambio climático en el sector agropecuario será negativo, debido a como sequías prolongadas y alteraciones en los patrones de lluvias (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019). Costa Rica, y en general toda Centroamérica, han sido identificados dentro de los “puntos calientes” de cambio climático en el área tropical, con reducciones en la precipitación y aumentos de temperaturas mínimas de hasta 4 °C, particularmente en la zona norte del istmo centroamericano (Imbach et al., 2018). Esto conlleva serios impactos en la disponibilidad de agua y seguridad alimentaria, con potenciales efectos negativos en la producción agropecuaria de Costa Rica (Quesada-Chacón et al. 2021; Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, 2016), en especial durante los años con influencia del fenómeno del Niño.

Con el objetivo de mejorar la gestión del agua en la agricultura, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) creó el modelo AquaCrop (Steduto et al., 2009), que simula el crecimiento, la productividad y el uso de agua de los cultivos (Salman et al., 2021). El modelo utiliza parámetros de fácil adquisición en campo (datos climáticos, propiedades del cultivo y del suelo) para entender las interacciones clima-suelo y su efecto en la productividad del agua (PA). La PA o eficiencia en el uso del agua (rendimiento/agua utilizada), es una característica integradora que permite evaluar la respuesta de los agroecosistemas al entorno (Steduto et al., 2012; Yadav et al., 2024).

Cultivos como algodón (*Gossypium spp*), papa (*Solanum tuberosum*), maíz (*Zea mays*), arroz (*Oriza sativa*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), trigo (*Triticum spp.*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y soya (*Glycine max*) cuentan con una calibración robusta en AquaCrop, respaldada con datos provenientes de múltiples ensayos bajo distintas condiciones de producción (Raes et al., 2023). Esto permite su uso de forma más confiable para procesos de validación en otras condiciones agroecológicas. En contraste, otros cultivos como el frijol común requieren una etapa previa de calibración y validación para ajustar parámetros específicos del modelo asociados al cultivo (Chinchilla Hidalgo, 2023; Raes et al., 2023).

La soya (*Glycine max* (L.) Merr.), se encuentra bien parametrizada en Aquacrop (Raes et al., 2023) con múltiples aplicaciones (dos Santos Farias et al., 2024; Kreuz Rosa et al., 2023; Morales-Santos et al., 2023). Este es un cultivo oleaginoso y una leguminosa rica en proteína, del que se siembran aproximadamente 126 millones de ha y se produce 366 millones de toneladas de grano (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], s.f.). Además, se espera que su producción ascienda un 0,9 % anual para 415 millones de toneladas en el 2032, y

es un cultivo que en Latinoamérica se beneficia de su rápido crecimiento y que las condiciones permiten hasta dos ciclos anuales (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] - FAO, 2023).

En Costa Rica, el cultivo de soya (*Glycine max* (L.) Merr.), ha vuelto a captar la atención impulsado por el impacto de diversos factores ambientales, sociales, económicos y geopolíticos, y su producción se plantea para disminuir la vulnerabilidad del sector agropecuario (Cordero, 2023). Desde 1990, el Centro de Investigación en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica ha trabajado en la adaptación y mejoramiento de variedades de soya para condiciones tropicales (Villalobos & Camacho, 1999). Entre estas, destaca la variedad CIGRAS-06, la cual se desempeña bien bajo condiciones de estrés hídrico, además, su cosecha en etapa R6, representa una estrategia de nutrición animal eficiente (Tobía & Villalobos, 2004).

La utilización de modelos de simulación como Aquacrop podría resultar en una herramienta valiosa para la toma de decisiones con miras al establecimiento de nuevas áreas de cultivo o la optimización de áreas existentes. Pero es necesario evaluar la capacidad que el modelo tiene de generar información para las variedades locales. Por lo que en este estudio se consideran de diversos aspectos metodológicos con el objetivo de evaluar el modelo AquaCrop en la estimación del rendimiento y la productividad del agua en el cultivo de la soya variedad CIGRAS-06.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

La investigación se realizó de junio a octubre del 2018 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM) de la Universidad de Costa Rica (10°00'25" N, -84°15'34" W) a 849 m s. n. m. en la provincia de Alajuela, Costa Rica. La EEAFBM se ubica dentro de la zona de vida del bosque premontano subhúmedo caliente, con una estación seca bien definida de diciembre a abril. La precipitación anual promedio es de 1939,6 mm, la temperatura promedio del aire es cercana a los 22 °C, humedad relativa promedio de 78 % y una evaporación promedio de 1875,9 mm (Gutiérrez et al., 1997).

El suelo de la zona experimental se clasifica dentro del orden de los Inceptisoles y en el suborden Ustepts (Mata et al., 2016). Se caracteriza por ser un suelo joven, de alta fertilidad, con texturas franco-arenosas o franco-arcillosas, con régimen de humedad ústico y buen drenaje (Soil Survey Staff, 2014). El suelo no presenta problemas de fertilidad ni acidez según el análisis químico realizado a la siembra.

Componentes del modelo AquaCrop

AquaCrop V 7.1 es un modelo dinámico que considera el sistema suelo – planta - atmósfera como un continuo para simular el rendimiento potencial de los cultivos herbáceos. Los parámetros mínimos de entrada son los componentes del clima (temperatura, precipitación, demanda de evaporación y concentración de CO₂), del cultivo (días después de la siembra para alcanzar la floración, la madurez fisiológica y la senescencia) y del suelo (parámetros físicos que determinan el flujo de agua en el suelo: conductividad hidráulica, contenido de humedad a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y saturación). Adicionalmente se pueden considerar aspectos de manejo como riego, control de malezas y fertilización (Steduto et al., 2012).

En el flujo de trabajo se distinguen dos fases: *la calibración*, en la cual se generan simulaciones, se comparan con los datos de campo y se realizan modificaciones en los parámetros para mejorar el ajuste entre valores simulados y reales; y *la validación/evaluación*, en la cual se generan simulaciones y se comparan los datos obtenidos con valores reales sin ajustes adicionales, para evaluar su desempeño. El modelo posee parámetros conservativos

(permanecen constantes bajo diferentes condiciones de crecimiento y regímenes hídricos), y no conservativos (dependen de la ubicación, la variedad del cultivo y prácticas de manejo, entre otros) (Steduto et al., 2009); y que son los que se modificaron como parte de esta investigación.

Características climáticas

Se utilizaron datos climáticos de 1995 al 2018, de la estación meteorológica localizada en la EEAFBM incluyendo datos diarios de temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y precipitación (mm). La evapotranspiración potencial (ET_p) se calculó con la ecuación Penman Monteith y se usaron los valores de dióxido de carbono incluidos en Aquacrop, provenientes del Observatorio Mauna Loa (Hawaii, USA). Los datos faltantes en la serie climática se completaron según Ureña et al. (2016) con estaciones meteorológicas cercanas. El periodo de simulación (6 de junio al 23 de octubre del 2018) se caracterizó por una temperatura promedio de 24,4 ± 1,15 °C, una humedad relativa promedio de 69,68 ± 6,43 % y una precipitación acumulada de 782 mm.

Parámetros de suelo

Para la caracterización edáfica, se realizó una calicata (1 x 0,50 m) y se tomaron muestras a cuatro profundidades (0-0,05; 0,05-0,30; 0,30-0,35 y 0,35-0,50 m). La textura se determinó según el método de Bouyoucos (Day, 1965), el contenido de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) se determinaron por el método de ollas de presión (Forsythe, 1985) y el contenido de materia orgánica (MO) por combustión seca en un analizador elemental basado en el principio de Dumas. El contenido de humedad a 5 cm de profundidad se determinó semanalmente con un sensor de capacitancia con valores promedios de 28,08 ± 8,0 %, inferiores a 20 % en junio-julio y superiores a 40 % en octubre.

Se utilizó la ecuación de pedotransferencia (Van Looy et al., 2017) de Saxton y Rawls (2006) incluida en la calculadora de características de agua del suelo (SWCH por sus siglas en inglés); para generar los valores de CC, PMP, conductividad hidráulica (CH) y el contenido de humedad a saturación (SAT); con el fin de evaluar cuál es la sensibilidad del modelo cuando se utilizan datos generados por medio de este tipo de ecuaciones y compararlos con los de campo. Debido a que la CH y el valor de SAT no se pudieron evaluar en campo, se utilizaron los valores de esta ecuación para completar el set de datos de campo (denominado C_SWCH).

Cultivo y determinación del crecimiento del cultivo

El estudio se desarrolló del 6 de junio al 23 de octubre del 2018. Se utilizó la soya variedad CIGRAS-06. Se estableció en una parcela de 920 m² con una densidad de 8,33 plantas/m² (0,80 x 0,15 m). La semilla se inoculó con *Rhizobium* sp. Se fertilizó a la siembra con la fórmula comercial 10-30-10 (N,P,K) a una dosis de 200 kg/ha. La cobertura del dosel (CD) se estimó con la ecuación 1 (desarrollada para soya y maíz por Steduto et al. (2012). El índice de área foliar (IAF) se midió bisemanalmente con un ceptómetro en cinco puntos al azar en la parcela.

$$CD = 1,005[1 - \exp(-0,6 IAF)]^{1.2} \quad (1)$$

Donde CD es cobertura del dosel e IAF es índice de área foliar.

Determinación de la biomasa y rendimiento

Los muestreos de biomasa aérea se realizaron los días 20, 28, 35, 42, 50, 63, 72, 79, 92 y 140 después de la siembra. Se tomaron 7-8 plantas (1 m²) en cinco puntos y se determinó el peso fresco y seco (estufa a 105 °C por 48 horas). El rendimiento se evaluó mediante el muestreo de 1 m² en cinco puntos. Las vainas se separaron de la planta y se extrajo el grano pesado a 12% de humedad. La soya experimenta pérdida del follaje cuando llega a madurez fisiológica, por lo que el valor de la biomasa final se calculó sumando el rendimiento (peso seco del grano) al peso de la biomasa seca el día 90.

Evaluación del modelo

Para la evaluación del modelo Aquacrop V.7.1 se modificó el archivo de soya que proporciona por defecto el modelo en función de características del cultivar CIGRAS-06, y se ajustaron los parámetros no conservativos (Cuadro 1) del ciclo del cultivo y su fenología. La evaluación de los resultados de la simulación se realizó hasta lograr el mejor ajuste posible entre los valores simulados y los datos medidos en campo. Para la revisión del ajuste se utilizaron una combinación de indicadores estadísticos (Cuadro 2), que es más robusto (Porrás-Jorge et al., 2020) que un solo indicador debido a las limitaciones de cada parámetro.

Cuadro 1. Parámetros utilizados del cultivo de soya para la evaluación y calibración del modelo AquaCrop. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Table 1. Soybean crop parameters used for the evaluation and calibration of the AquaCrop model. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Parámetro	Valor	Tipo de parámetro
Tipo de siembra	Directa	No conservativo
Densidad de las plantas (plantas/ha)	83 300	No conservativo
Distancia de siembra (m)	0,80 x 0,15	No conservativo
Emergencia (dds)	5	No conservativo
Floración (dds)	72	No conservativo
Máxima cobertura del dosel (dds)	92	No conservativo
Duración de la floración (dds)	63	No conservativo
Coficiente de cobertura del dosel inicial (%)	0,42	Conservativo
Coficiente de máxima cobertura del dosel (%)	0,98	Conservativo
Índice de cosecha de referencia (%)	40	Conservativo
Productividad del agua normalizada WP (g m ⁻²)	15	Conservativo

dds: Días después de la siembra. / **dds:** Days aftes sowing.

Resultados

Características del suelo

El suelo se catalogó es franco arcilloso con una densidad aparente (DA) alta (Cuadro 3) que aumentó con la profundidad, lo que coincide con la disminución de más del 50 % en la CH en los niveles inferiores del perfil

Cuadro 2. Valores recomendados para la eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF); el índice de Wilmott o similitud (d), la raíz del cuadrado medio del error normalizado (NRMSE) y el coeficiente de determinación (R^2).

Table 2. Recommended values for Nash-Sutcliffe Efficiency (EF); the Wilmott Index or similarity (d), the root mean square of the normalized error (NRMSE) and the coefficient of determination (R^2).

Evaluación del desempeño	EF	d	NRMSE	R^2
Muy bueno	0,75-1,00	d >0 ,90	Cercano a 0	$R^2 > 0,9$
Bueno	0,65-0,75	0,80-0,89		0,80-0,89
Satisfactorio	0,50-0,65	0,50-0,79		0,5-0,79
Insatisfactorio	EF < 0,50	d < 0,05		$R^2 < 0,05$
Aplicación y consideraciones	Para determinar la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de las observaciones (Tornés Olivera et al., 2016).	Valores relativamente altos pueden ser obtenidos aun cuando el modelo funciona mal y aún es muy sensible a sobre o subestimación. (Terán-Chaves, 2022).	Representa la medida global entre los valores observados y simulados por lo que se considera un indicador de incertidumbre (Terán-Chaves, 2022)	Resultante de correlacionar linealmente los valores simulados y los medidos y se ve afectado por el número de observaciones.

Adaptado de Porras-Jorge et al. (2020), Raes et al. (2018). Los parámetros se calculan según las ecuaciones incluidas en esas referencias. / Adapted from Porras-Jorge et al. (2020), Raes et al. (2018). Parameters are calculated according to the equations included in those references.

Cuadro 3. Contenido de partículas, clase textural del suelo y constantes hídricas del suelo obtenido in campo y calculada con el programa SWCH. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Table 3. Particle content, textural class of the soil and water related constants obtained in the field and calculated with the SWCH program. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Datos de campo*							Datos generados con SWCH **				
Profund. (cm)	Arena %	Limo %	Arcilla %	MO %	PMP (vol %)	CC (vol %)	Den. Apar. (g/cm ³)	PMP (vol %)	CC (vol %)	CH (mm/ día)	SAT (%)
0-5	37	31	32	8,3	22	30	1,16	22	37	388,6	56,3
5-30	45	25	30	6,3	23	29	1,27	21	34	297,1	52,0
30-35	40	23	37	5,6	24	30	1,32	24	37	128,2	50,2

*Todos los horizontes fueron catalogados como Franco Arcillosos según los datos del laboratorio **Todos los horizontes fueron catalogados como Franco arcillosos excepto el de 5-30 Franco arcillo arenoso según la SWCH. /*All horizons were classified as Clay Loam according to laboratory data **All horizons were classified as Clay Loam except for the 5-30 Sandy Clay Loam according to SWCH.

MO: Materia orgánica, **PMP:** Contenido de humedad al punto de marchitez permanente. **CC:** Contenido de humedad a capacidad de campo. **CH:** Conductividad hidráulica. **SAT:** Contenido de humedad a Saturación. / **MO:** Organic matter, **PMP:** Permanent wilting point moisture content. **CC:** Field capacity moisture content. **CH:** Hydraulic conductivity. **SAT:** Saturation moisture content.

de suelo reportada por el SWCH. En general el SWCH reporta valores mayores (16 %) de contenido de agua a capacidad de campo (CC) en comparación con los datos de campo (C_SWCH), pero se mantiene similar para el en el punto de marchitez permanente (Cuadro 3), con diferencias importantes en el agua útil entre C_SWCH ($6,6 \pm 1,5$ %) y SWCH ($13,6 \pm 1,5$ %).

Evaluación de la cobertura del dosel y biomasa

El modelo subestimó la cobertura del dosel en 36 % con datos de suelo de C_SWCH y en 33 % para SWCH. La subestimación fue más evidente en las primeras etapas del desarrollo del cultivo (Figura 1a) (50 días después de la siembra). Hacia el final del ciclo esta diferencia se redujo a un 7 % con datos de C_SWCH y a un 2 % con SWCH. Durante el ciclo de cultivo se estimó la cobertura promedio fue 54 %, superior al 44,3 % simulado con C_SWCH y 47 % con SWCH. Los parámetros estadísticos mostraron un buen ajuste (R^2 d, EF > 0,89) (Cuadro 4), pero valores superiores al 10 % para el RMSE y el NRMSE susceptibles a mejora.

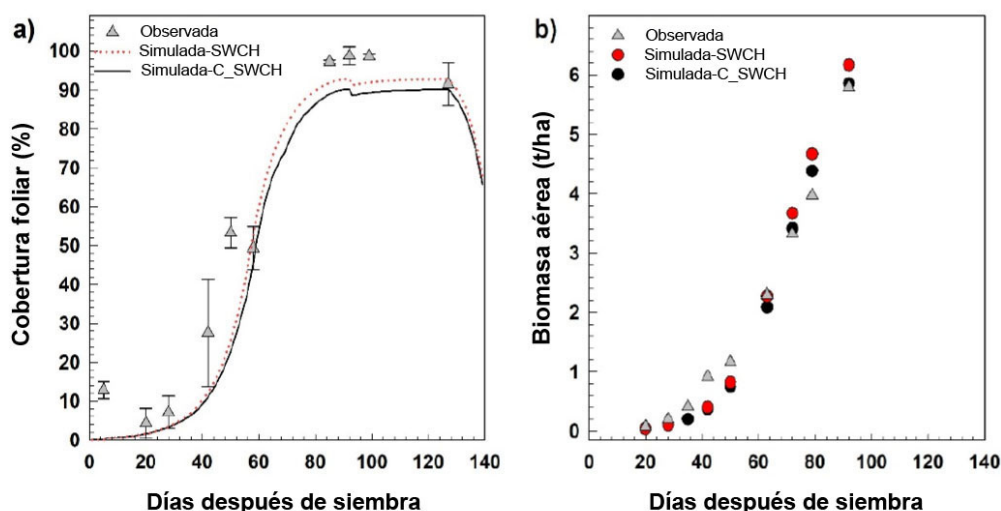


Figura 1. Valores medidos y simulados con AquaCrop para a) cobertura del dosel y de b) la biomasa de soya var. CIGRAS-06 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Junio a Octubre del 2018.

Los datos simulados se generaron con diferentes valores para el suelo, utilizando datos generados con la Calculadora de propiedades de agua del suelo (SWCH) o de campo y SWCH (C_SWCH).

Figure 1. Measured and simulated values with AquaCrop for a) canopy cover and b) biomass of soybean var. CIGRAS 06 at the Fabio Baudrit Moreno Experimental Station, Alajuela, Costa Rica. June to October 2018.

Simulated data were generated with different values for the soil, using data generated with the Soil Water Properties Calculator (SWCH) or from the field and SWCH (C_SWCH).

El modelo simuló adecuadamente el comportamiento del desarrollo de la biomasa en campo hasta del día 90 (Figura 1b), después del día 90 no se cuenta con datos de biomasa para la comprobación adicional debido a pérdida de parte de las muestras de la validación. Los valores promedio para el ciclo de biomasa simulados para C_SWCH ($2,03 \text{ t ha}^{-1}$) y los de SWCH ($2,04 \text{ t ha}^{-1}$) estuvieron muy cercanos a los observados ($2,14 \text{ t ha}^{-1}$). Los parámetros de desempeño (Cuadro 4) fueron muy buenos para EF, R^2 y d con valores superiores al 0,95 y un RMSE bastante bajo.

Cuadro 4. Indicadores estadísticos para la simulación de la cobertura del dosel y la biomasa. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Table 4. Statistical indicators for the simulation of canopy cover and biomass. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Método	R ²	RMSE (%)	NRMSE (%)	EF	(d)	Promedio observado*	Promedio simulado
Parámetros para cobertura foliar						Cobertura foliar (%)	
C_SWCH	0,98	12,70	23,60	0,89	0,97	54	44,3
SWCH	0,98	11,40	21,10	0,91	0,98	54	47,0
Parámetros para biomasa (t ha ⁻¹)						Biomasa (t ha ⁻¹)	
C_SWCH	0,99	0,3	14,1	0,96	0,99	2,01	2,03
SWCH	0,99	0,4	17,9	0,96	0,99	2,01	2,04

Los datos simulados se generaron con diferentes valores para el suelo, utilizando datos generados con la calculadora de propiedades de agua del suelo (SWCH) o la combinación de datos de campo y SWCH (C_SWCH) (n=10). / Simulated data were generated with different soil values, using data generated with the Soil Water Properties Calculator (SWCH) or the combination of field and SWCH data (C_SWCH) (n=10).

*El promedio observado es calculado por el modelo a partir de los datos introducidos para la estimación de desempeño. / *The observed average is calculated by the model from the input data for performance estimation.

R² = Coeficiente de determinación. **RMSE** = Raíz del error cuadrático medio. **NRMSE** = Raíz del error cuadrático medio normalizada. **EF** = Eficiencia de Nash-Sutcliffe, **d** = Índice de Wilmott o similitud. / **R²** = Coefficient of determination. **RMSE** = Root mean square error. **NRMSE** = Normalized root mean square error. **EF** = Nash-Sutcliffe efficiency, **d** = Wilmott index or similarity.

Rendimiento y productividad del agua

El cultivo tuvo un rendimiento en peso seco de $3,88 \pm 0,69$ t ha⁻¹, cercano a los valores simulados de 4,15 t ha⁻¹ para C_SWCH y de 4,19 t ha⁻¹ para SWCH. En tanto que los valores de biomasa reales de $9,67 \pm 2,05$ t ha⁻¹ también fueron bastante próximos valores máximos simulados de 10,25 t ha⁻¹ para C_SWCH y 10,63 t ha⁻¹ para SWCH. En ambas simulaciones la productividad del agua o eficiencia en el uso del agua (kg de rendimiento por m³ de agua transpirada) fue de 0,63, con una leve diferencia en el agua transpirada de 428,0 mm para C_SWCH y 441,7 mm para SWCH.

Discusión

El rendimiento obtenido $3,88 \pm 0,69$ t ha⁻¹ es cercano a valores reportados para soya en otras áreas del Costa Rica ($3,91$ - $4,8$ t ha⁻¹) (Tobía & Villalobos, 2004; Villalobos & Camacho, 1999). El modelo AquaCrop V 7.1 sobreestimó el rendimiento del cultivo cerca de un 7 %, pero el valor estuvo dentro de la desviación estándar de los datos de campo. Los resultados coinciden con estudios realizados en Brasil donde el modelo fue utilizado con éxito en 19 cosechas con un rendimiento simulado de 3,97 t ha⁻¹ y $R^2 > 0,97$, pero con una subestimación generalizada del rendimiento (Kreutz Rosa et al., 2023).

Aunque las diferencias en el agua útil del suelo (diferencia entre CC y PMP, Cuadro 3) entre los escenarios simulados superan el 50 % entre SWCH ($13,6 \pm 1,5$ %) y C_SWCH ($6,6 \pm 1,5$ %), esta variación solo representa una diferencia del 1 % entre los rendimientos simulados. Lo cual puede estar asociado a que el ensayo se realizó en época lluviosa (agua del suelo no limitante). Las salidas del modelo muestran una afectación del 6 % en el desarrollo

del dosel para C_SWCH durante parte del período de floración, pero no se observan períodos prolongados de estrés hídrico que causen cierre estomático.

El impacto de datos de suelo en las simulaciones, no constituye un análisis de sensibilidad completo, ya que es un caso puntual y no considera la variación temporal de la precipitación (Lu et al., 2021), sin embargo, es un aspecto relevante que merece exploración. El uso de ecuaciones de pedrotransferencia, pese a sus limitaciones (Van Looy et al., 2017) podría disminuir costos en análisis. En AquaCrop, los parámetros que afectan la disponibilidad hídrica y el rendimiento del cultivo son los más sensibles (González-Robaina et al., 2019), pero se ha señalado (Lu et al., 2021) que versiones posteriores a la 6.0 son menos sensibles a las incertidumbres en las propiedades del suelo.

La predicción global del modelo para rendimiento y biomasa total se consideró satisfactoria durante el desarrollo del cultivo; a pesar de que el modelo subestima el porcentaje de cobertura foliar (CF) globalmente en un 10 % y la biomasa en un 1,2 % (Cuadro 4) independientemente de los parámetros de suelo (Figura 1a). Los índices usados para evaluar similitud entre los patrones de progresión fueron $\geq 0,97$, resultados similares a los obtenidos por González-Robaina et al. (2019) para la variedad de soya G-7R-315 en Cuba, donde las predicciones de biomasa fueron buenas (RMSE = $0,79 \text{ t ha}^{-1}$, EF = 0,88 y d = 0,98); mientras que la cobertura vegetal fue sobreestimada durante todo el ciclo.

El patrón presentado en la Figura 1a es de los más comunes, donde la CF simulada difiere de la medida real desde la emergencia hasta alcanzar el máximo. Al respecto Steduto et al. (2012) sugirieron que la simulación se pudo mejorar alterando el tamaño de la plántula inicial o la densidad de siembra, aunque esto no afectó la simulación actual. Otra posible causa es el uso de datos de cobertura foliar generados con la ecuación 1, la cual ha sido ajustada para maíz y soya, pero que subestima la CF especialmente a valores bajos de IAF (Steduto et al., 2012). Por ello, sería recomendable implementar otras metodologías como fotografías o tomar más valores de IAF en el inicio del crecimiento.

Las diferencias en el patrón de la biomasa pueden deberse a que modelo no puede explicar ciertos procesos ambientales (variaciones de temperatura, humedad) y fisiológicos que ocurren en la planta (Tornés Olivera et al., 2016). En una simulación con quinoa (*Chenopodium quinoa*) también se observó una ligera sobreestimación de la biomasa final, atribuida a la falta de cuantificación de los descensos de la productividad del agua (Fajardo et al., 2016), tal y como lo observó dos Santos Farias et al. (2024) en soya. En el caso particular de la variedad CIGRAS-06, su clasificación como semi-indeterminada (Villalobos & Camacho, 1999), podría inferir en el patrón observado pues el modelo lo establece como indeterminado (Figura 1b). No obstante, para confirmar esto se requiere ensayos adicionales.

Los valores de evapotranspiración (ET) obtenidos para la variedad CIGRAS-06 (656 mm) coinciden con el rango mundial (300-800 mm) según Steduto et al. (2012). Pero los valores de productividad de agua de $0,63 \text{ kg m}^{-3}$ superiores a los reportados por Boligon Minuzzi et al. (2017) en Brasil de entre $0,58\text{-}0,60 \text{ kg m}^{-3}$, coincidente con su capacidad para tolerar estrés hídrico (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2015). Para este ensayo se da una mayor cantidad de agua transpirada (441,7 mm) en el modelo para datos de SWCH que para C_SWCH (428 mm), lo cual está asociado a las diferencias en el agua útil que generan las características del suelo.

Conclusiones

El modelo AquaCrop simula satisfactoriamente el rendimiento y la biomasa para el cultivo de soya variedad CIGRAS-06 en la época lluviosa. La subestimación del desarrollo del dosel debe mejorarse. La productividad de agua es mayor a la reportada en otros sitios y se observaron diferencias asociadas al agua disponible en el suelo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica (UCR) por financiamiento mediante el proyecto 802-B6-604 Fondo de Estímulo a CCS. Se agradece al personal de la EEAFBM, a la Dra. Adriana Murillo del CIGRAS y a la M.Sc Ana Gabriela Pérez del CICA, por su colaboración en la reproducción de la soya para la obtención de semilla. A Cristian Porras, Luis Oreamuno y María José Gómez por su apoyo labores de campo y en la toma de datos. Se agradece al Instituto Meteorológico Nacional por los datos mediante convenio 325.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Boligon Minuzzi, R., do Amaral Frederico, C., & Freira de Silva, T. G. (2017). Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for the Southern Brazil. *Revista Ceres*, 64(6), 567-573. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764060002>
- Chinchilla Hidalgo, K. (2023). *Validación del modelo AquaCrop para estimar el rendimiento de dos variedades comerciales de frijol común (Phaseolus vulgaris L.) bajo riego deficitario controlado*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio SIBDI de la Universidad de Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/22237>
- Cordero, J. (2023, febrero 20). *Agricultores retoman el cultivo de soya en Guanacaste con semilla UCR*. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2023/2/20/agricultores-retoman-el-cultivo-de-soya-en-guanacaste-con-semilla-ucr.html>
- Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle-size analysis. In C. A. Black, D. D. Evans, D. D. Ensminger, J. L. White, & F. E. Clark (Eds). *Methods of soil analysis* (pp. 545–567). American Society of Agronomy. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c43>
- dos Santos Farias, D. B., Neiva Rodrigues, L., & AlvesSouza, S. (2024). AquaCrop model assessment for simulating soybean response under water stress. *Ciência Rural*, 54(5), Article e20230168. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230168>
- Fajardo, H., García, M., Raes, D., & Van Gaalen, H. (2016). Validación del modelo Aquacrop para diferentes niveles de fertilidad en el cultivo de Quinoa en el Altiplano Boliviano. *Revista CINTEX*, 21(2), 31–52. <https://revistas.pascualbravo.edu.co/index.php/cintex/article/view/16>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *FAOSTAT: Database on crop yields*. Retrieved April 30, 2025 from <https://www.fao.org/faostat/en/>
- Forsythe, W. (1984). *Manual de laboratorio: física de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Forsythe W. (1985). *Manual de laboratorio: Física de suelos*. (2ª ed). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

- González-Robaina, F., López-Vargas, D., Cisneros-Zayas, E., Herrera-Puebla, J., & Cid-Lazo, G. (2019). Calibración y análisis de sensibilidad del modelo AquaCrop para frijol en suelo Ferralítico Rojo Compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4), 3-12. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1166>
- Gutiérrez, M. V., Soto, D., & Alpízar, M. (1997). Cuarenta años de observaciones meteorológicas en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno. *BOLTEC* 30(2), 1-14.
- Imbach, P., Chou, S. C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., Siqueira, G., Silva, A., Garofolo, L., & Georgiou, S. (2018). Future climate change scenarios in central America at high spatial resolution. *PLoS One*, 13(4), Article e0193570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193570>
- Intergovernmental Panel for Climate Change. (2019). *Special report: Climate change and land. Chapter 2: Land-climate interactions*. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-2/>
- Kreutz Rosa, S. L., Moretti de Souza, J. L., Oliveira, C. T., & Tsukahara, R. Y. (2023). Calibration and validation of the AquaCrop model to estimate soybean production in the Campos Gerais, Parana State, Brazil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 25(4), 1-13. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/8245>
- Lu, Y., Chibarabada, T. P., McCabe, M. F., De Lannoy, G. J. M., & Sheffield, J. (2021). Global sensitivity analysis of crop yield and transpiration from the FAO-AquaCrop model for dryland environments. *Field Crops Research*, 269, Article 108182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108182>
- Mata, R., Vázquez, A., Rosales, A., & Salazar, D. (2016). *Mapa digital de suelos de Costa Rica* (Escala, 1, 200000). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2015). *Estrategia de ganadería baja en carbono en Costa Rica*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1174.pdf>
- Morales-Santos, A., García-Vila, M., & Nolz, R. (2023). Assessment of the impact of irrigation management on soybean yield and water productivity in a subhumid environment. *Agricultural Water Management*, 284, Article 108356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108356>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032*. <https://doi.org/10.1787/2ad6c3ab-es>
- Porras-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W., & Ontiveros-Capurata, R. (2020). Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 309-321. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- Quesada-Chacón, D., Barfus, K., & Bernhofer, C. (2021). Climate change projections and extremes for Costa Rica using tailored predictors from CORDEX model output through statistical downscaling with artificial neural networks. *International Journal of Climatology*, 41(1), 211-232. <https://doi.org/10.1002/joc.6616>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2023). *AquaCrop: Version 7.1 reference manual* [Software Manual]. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Salman, M., García-Vila, M., Fereres, E., Raes, D. & Steduto, P. (2021). *The AquaCrop model – Enhancing crop water productivity. Ten years of development, dissemination and implementation 2009–2019* (FAO Water Report No. 47). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb7392en>

- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. (2016). *Plan Nacional para la Seguridad Alimentaria, Nutrición y Erradicación del Hambre 2025. Plan SAN-CELAC Costa Rica. I Quinquenio*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/cos177242.pdf>
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la taxonomía de suelos* (12^a ed.). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, & Servicio de Conservación de Recursos Naturales. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101, 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm>
- Terán-Chaves, C. A., García-Prats, A., & Polo-Murcia, S. M. (2022). Calibration and validation of the FAO AquaCrop water productivity model for perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Water*, 14(23), Article 3933. <https://doi.org/10.3390/w14233933>
- Tobía, C., & Villalobos, E. (2004). Producción y valor nutricional del forraje de soya en condiciones tropicales adversas. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 17-25. <https://doi.org/10.15517/rac.v28i1.61222>
- Tornés Olivera, N., Brown Manrique, O., Gómez Masjuan, Y., & Guerrero Alega, A. M. (2016). Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23-30. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/450>
- Ureña, P., Alfaro, E. M., & Soley, F. J. (2016). *Propuestas metodológicas para el rellenado de datos ausentes en series de tiempo geofísicas. Guía Práctica de uso*. Universidad de Costa Rica. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/b05ba1d5-3f25-4c5a-85f3-4d93f802752e/content>
- Van Looy, K., Bourn, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., & Vereecken, H. (2017). Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55, 1199-1256. <https://doi.org/10.1002/2017RG000581>
- Villalobos, E., & Camacho, F. (1999). Avances en el mejoramiento genético de la soya en Costa Rica: II. CIGRAS-06 y CIGRAS-10, dos nuevas variedades tropicales. *Agronomía Costarricense*, 23(1), 61-67.
- Yadav, M., Vashisht, B. B., Jalota, S. K., Jyolsna, T., Singh, S. P., Kumar, A., Kumar, A., & Singh, G. (2024). Improving water efficiencies in rural agriculture for sustainability of water resources: A Review. *Water Resources Management*, 38(10), 3505–3526. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03836-6>