



Modelización del rendimiento con Aquacrop-FAO en el cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.), Ecuador

Yield modeling with Aquacrop-FAO in peanut (*Arachis hypogaea* L.), Ecuador

Luis Matailo-Ramirez^{1, 2 *}; Ángel Eduardo Luna Romero¹; Julio Enrique Chabla Carrillo¹; Paola Alicia Gálvez Palomeque¹

¹ Universidad Técnica de Machala, 5.5 km Av. Panamericana, Machala, El Oro. Ecuador.

² Semillero de Investigación en Fitotecnia (SINFIT). Ecuador.

* Autor corresponsal: lmatailo2@utmachala.edu.ec (L. Matailo-Ramirez).

ID ORCID de los autores

L. Matailo-Ramirez:  <https://orcid.org/0000-0002-8306-9470>

Á. Luna-Romero:  <https://orcid.org/0000-0002-4311-9445>

J. Chabla-Carrillo:  <https://orcid.org/0000-0002-9761-5890>

P. Gálvez-Palomeque:  <https://orcid.org/0000-0003-4080-2019>

RESUMEN

El cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.) es una leguminosa de grano de gran importancia en regiones áridas y semiáridas, durante el transcurso de los años la creciente variabilidad climática ha causado variaciones climáticas que han afectado el desempeño agrícola, el modelo Aquacrop surge como una de las primeras opciones ante la evaluación potencial del rendimiento de los cultivos, ofreciendo una alternativa relativamente económica frente a los ensayos de campo los cuales consumen tiempo y a menudo son costosos. Ante lo expuesto, se llevó a cabo una prueba de campo con el objetivo de evaluar y calibrar del rendimiento del cultivo de maní haciendo uso del software Aquacrop como herramienta principal en los procesos de toma de decisiones. Los resultados mostraron que el rendimiento del modelo fue bueno al simular la cobertura dosel (%) y biomasa ($t\ ha^{-1}$) (n RMSE= 1,10% y 4,41 $t\ ha^{-1}$, respectivamente). Por otro lado, el modelo no sobreestimó los valores de evapotranspiración; en general el modelo funcionó bien ante las simulaciones de CC y biomasa acumulada, mostrando de esta manera un gran potencial para simular estas variables, sin embargo, es necesario seguir probando la respuesta del modelo ante diferentes climas y suelos de la región.

Palabras clave: Aquacrop; Maní; Modelado; Productividad; Evapotranspiración.

ABSTRACT

The peanut (*Arachis hypogaea* L.) crop is a grain legume of great importance in arid and semi-arid regions, during the course of the years the increasing climatic variability has caused climatic variations that have affected agricultural performance, and the Aquacrop model emerges as one of the first options for the potential evaluation of crop yield, offering a relatively economical alternative to field trials which are time-consuming and often costly. Given the above, a field trial was carried out to evaluate and calibrate peanut crop yield using the Aquacrop software as the main tool in the decision-making process. The results showed that the performance of the model was good when simulating canopy cover (%) and biomass ($t\ ha^{-1}$) (n RMSE= 1.10% and 4.41 $t\ ha^{-1}$, respectively). On the other hand, the model did not overestimate the evapotranspiration values; in general, the model performed well for the CC and accumulated biomass simulations, thus showing a great potential to simulate these variables, however, it is necessary to continue testing the model's response to different climates and soils of the region.

Keywords: Aquacrop; Peanut; Modeling; Productivity; Evapotranspiration.

Recibido: 30-01-2023.

Aceptado: 24-03-2023.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La creciente variabilidad climática en la actualidad ha causado variaciones en los parámetros climatológicos que afectan directa e indirectamente a la mayoría de cultivos agrícolas entre ellos el maní (*Arachis hypogaea* L.), cambiando la forma de producción y causando de esta manera el retraso productivo en el sector, generando de esta manera bajos ingresos económicos en las familias que lo comercializan, además del desabastecimiento hacia las industrias y consumo interno, este cultivo es muy popular por sus múltiples usos entre los que se destacan la obtención de aceite o crema de maní (Chibarabada et al., 2020).

El maní es una leguminosa de grano importante en las regiones áridas y semiáridas (Chibarabada et al., 2017). Según el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) (2004) en el país se cultivan alrededor de 15.000 a 20.000 ha anuales, donde las provincias mayormente productoras son: Loja, Manabí, El Oro y Guayas, convirtiéndose en un cultivo estratégico para la intensificación sostenible debido a que se ha asociado con una alta fijación de nitrógeno.

Para una producción exitosa de maní, se necesita información sobre su adaptabilidad a estas regiones, esto requiere inversiones en tiempo y recursos en investigación, que a menudo son limitados. Los modelos de crecimiento de cultivos se han desarrollado en parte para responder preguntas de investigación, limitando así el tiempo y los recursos gastados en la realización de experimentos de campo en diversos entornos y manejos (Rauff & Bello, 2015). Estos modelos simulan el crecimiento y desarrollo de cultivos bajo diferentes condiciones utilizando relaciones empíricas y matemáticas, siendo herramientas muy valiosas en el apoyo muy útiles en la toma de decisiones (González et al., 2018).

A lo largo de los años se ha logrado modelar con éxito el rendimiento de los cultivos mediante el uso del sistema simulador de producción agrícola (APSIM) (Robertson et al., 2002) y el sistema de apoyo a la decisión para la transferencia de tecnología agrícola (DSSAT, por sus siglas en inglés) (Jones et al., 2003) en diferentes condiciones de manejo, pero el uso se limitó debido

a su complejidad ya que estos modelos requieren una cantidad relativamente grande de parámetros de entrada los cuales son difíciles de obtener en campo, especialmente cuando los recursos son muy limitados (Jones et al., 2017).

Teniendo en cuenta la complejidad de los primeros modelos mencionados, la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) desarrolló un modelo simple pero capaz de mantener la precisión y solidez denominado Aquacrop (Steduto et al., 2009), el modelo Aquacrop constituye una alternativa de utilidad para modelar los efectos del cambio climático, además permite plantear soluciones anticipadas, factibles (riego deficitario, fertilización, manejo de variedades precoces, entre otros) sin olvidar que, como todo modelo, simplifica la realidad y por tanto presenta algunas limitaciones. El modelo no solo está dirigido a investigadores sino también a estudiantes y agricultores mostrando que pueden estar preparados ante los factores adversos o en algunos casos sacar ventaja de las condiciones futuras (Steduto et al., 2009).

Aquacrop tiene el potencial de ser una herramienta útil de apoyo a la toma de decisiones para la producción de leguminosas de grano en regiones áridas y semiáridas, actualmente, esto es limitado ya que solo unas pocas leguminosas de grano (soya, maní bambara y guisantes) han sido calibradas y validadas para Aquacrop, para ello es necesario calibrar y probar el modelo para más cultivos de leguminosas de grano (Chibarabada et al., 2017). Actualmente, existe muy poca disponibilidad de investigaciones que han apuntado a calibrar el modelo para maní lo que hace que sea un paso inicial para una mayor aplicación de Aquacrop en el cultivo, esto llevaría a responder preguntas de investigación sobre la adaptabilidad del maní a la disponibilidad variable de agua y condiciones ambientales. Por lo anteriormente expuesto el objetivo del presente estudio fue calibrar y modelizar el rendimiento del cultivo de maní haciendo uso del software Aquacrop como herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, para la aplicabilidad en la estimación de la capacidad productiva en distintas condiciones climáticas y de manejo en Ecuador.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación del sitio de estudio, diseño de campo y manejo

La investigación se clasificó como no experimental, ya que se basó en el uso de un modelo de simulación de crecimiento de cultivos de tipo

transeccional descriptiva-correlacional, se llevó a cabo durante los meses de julio - noviembre del año 2022 en la Granja "Santa Inés" perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH),

ubicada a 5,5 km de la vía Machala - Pasaje, parroquia El Cambio, cantón Machala, provincia de El Oro (Figura 1). Para el desarrollo de la investigación se contó con un área de 58,8 m² y cada parcela fue de 5,5 m x 1 m (5,5 m²) con 2 camas por parcela. La siembra se realizó el día 23 de Julio del 2022, la variedad sembrada fue maní criollo negro, la cual fue recolectada por productores de las zonas cercanas al cantón, la siembra se realizó de manera manual donde se colocaron 2 semillas por cada hueco a una profundidad de 2 cm, el control de arvenses se realizó de manera manual donde se llevó aproximadamente cada dos semanas para reducir la competencia por agua y nutrientes.

Requisitos de entrada del modelo Aquacrop y recopilación de datos

Datos climáticos

Los datos meteorológicos de entrada que exige el modelo son: temperatura diaria, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa y precipitación. Los datos de temperatura diaria y humedad relativa se tomaron mediante el uso de un termohigrómetro digital, el dato de precipitación se obtuvo con la ayuda de un pluviómetro manual, las demás variables fueron tomadas del geo portal climático del proyecto NASA POWER (<https://power.larc.nasa.gov>), las

estimaciones de evapotranspiración de referencia diaria (ET_o) se calcularon mediante el método de Penman-Montieh (Allen et al., 2006, Lavado et al., 2015), para los datos de concentración de dióxido de carbono atmosférico medio (CO₂) se utilizó el archivo predeterminado de Moana Loa, Hawái (<https://gml.noaa.gov/ccg/trends/data.html>).

Datos del suelo

Para la obtención de los datos de suelo se realizó una calicata en la parte céntrica de la parcela experimental donde se identificaron los horizontes presentes y se recolectaron muestras para su posterior análisis en laboratorio.

Para el cálculo de capacidad de campo, punto de saturación y conductividad hidráulica saturada se utilizó el software SPAW, en el módulo Soil Water Characteristics desarrollado por el Departamento de Agricultura (USDA, por su sigla en inglés) (Saxton, 2002). 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, %; CC el contenido de humedad a la capacidad de campo, %.

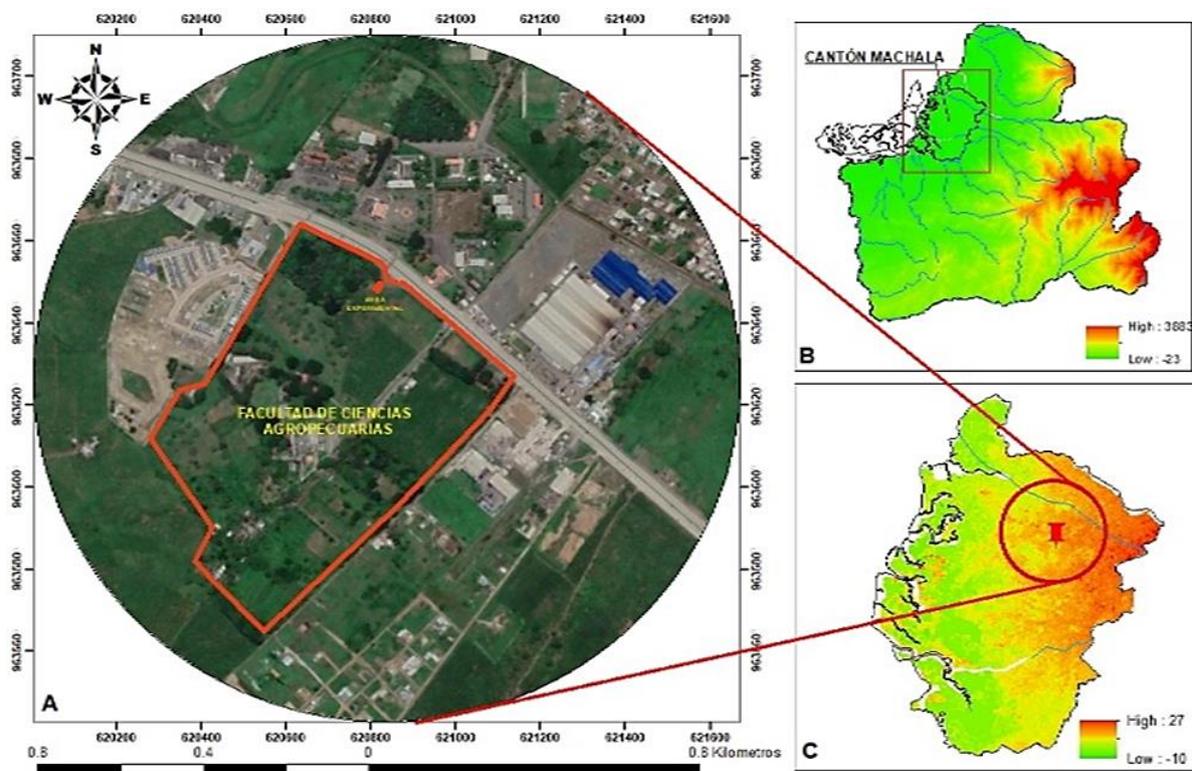


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, A) Vista satelital del área experimental, B) Mini mapa de la provincia de El Oro, el recuadro de color rojo muestra la ubicación del cantón Machala, C) Cantón Machala, el punto rojo muestra la ubicación de la granja Santa Inés.

Tabla 1
Descripción de las propiedades físicas del suelo

Propiedades	Unidad	Método
Textura	-	(TLSFCA*), (Villaseñor Ortiz, 2016)
Densidad aparente	g cm ⁻³	(TLSFCA**), (Villaseñor Ortiz, 2016)
Capacidad de campo (CC)	(%)	(USDA-SPAW), (Saxton, 2002)
Punto de marchitez (PMP)	(%)	PMP= CC/1.84 (Cisneros, 2003)
Punto de saturación	(%)	(USDA-SPAW), (Saxton, 2002)
Conductividad hidráulica saturada	mm/sg	(USDA-SPAW), (Saxton, 2002)
Agua disponible (ADT)	mm/m	ADT=10*(CC-PMP)
Fracción de agotamiento permisible	-	Criterio de Allen et al. (1998)

*TLSFCA: Tomado del laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias.

**USDA- SPAW: Software del departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Desarrollo fenológico, biomasa aérea, cobertura de dosel y rendimiento

El desarrollo fenológico del cultivo fue monitoreado a lo largo de todo su ciclo vegetativo con registros de manera semanal, el muestreo de biomasa fue mensual, tomando 5 plantas al azar dentro del área de investigación, estimando el peso en húmedo. Luego se dejó secar durante 48 horas en estufa a 80 °C siguiendo la metodología aplicada por Chibarabada (2020), pesando la materia seca. La cobertura de dosel se monitoreó usando la aplicación móvil conopeo de la Universidad Estatal

de Oklahoma (www.canopeoapp.com), usando imágenes tomadas en 3 ubicaciones al azar dentro de la parcela (valor de dosel promedio), semanalmente. El rendimiento se calculó con la metodología de Khov (2017), registrando los pesos en fresco de las vainas, y dejando secar durante 48 h, se registraron datos de peso secos.

Estadística para la simulación del modelo

Para evaluar la calidad de simulación del modelo se tomaron en cuenta los siguientes indicadores estadísticos: Coeficiente de determinación (R²), raíz del cuadrado medio del error (RMSE), el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (FE) y el índice de concordancia de Willmott (índice d) (Lorite et al., 2015), en donde el rendimiento general del modelo se consideró bueno cuando al menos 3 de los 4 indicadores de evaluación del modelo fueron de buenos a muy buenos (Tabla 2).

$$R^2 = \frac{Scr}{Sct} \times 10 \tag{2}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \tag{3}$$

$$RMSE = \frac{1}{M} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{N}} \tag{4}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \tag{5}$$

Donde: Scr es la suma de cuadrados respecto a la regresión; Sct es suma total de cuadrados; M son valores medios; S son valores simulados; y, N es número de observaciones.

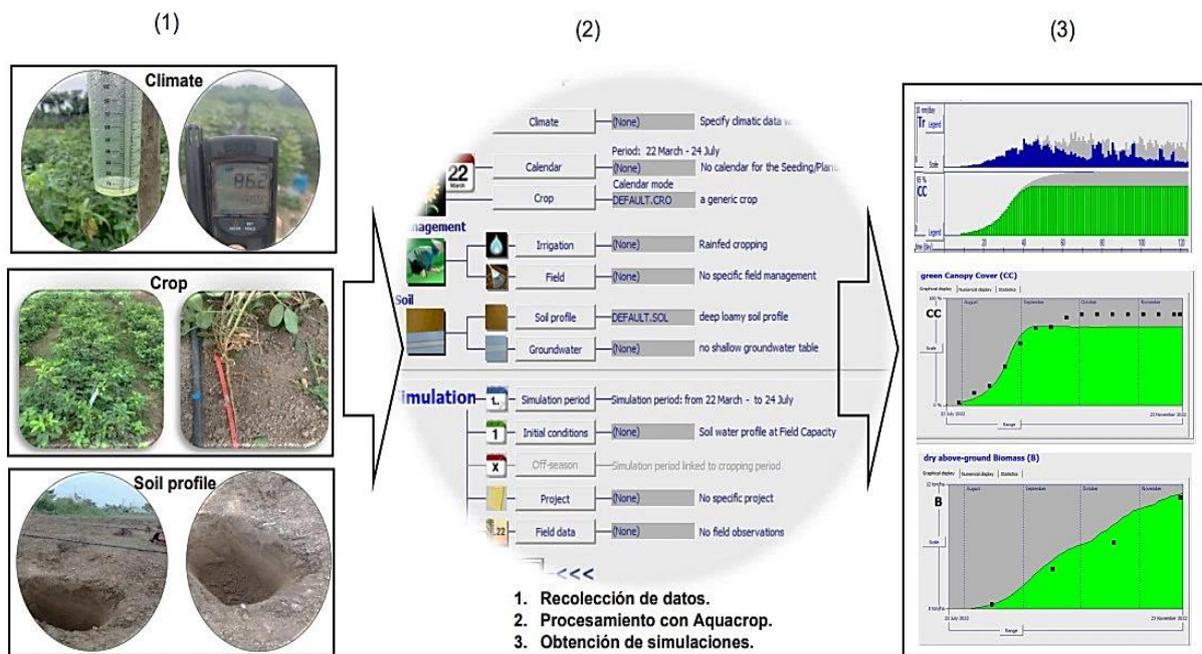


Figura 2. Procesamiento de la información para la obtención de simulaciones en modelo Aquacrop.

1. Recolección de datos.
2. Procesamiento con Aquacrop.
3. Obtención de simulaciones.

Tabla 2

Descripción de los indicadores estadístico para simulación del modelo.

Indicador	Valor	
R ²	< 0,90	Muy bueno
	0,50 – 0,70	Moderadamente buenos
	< 0,50	Malos
RMSE	0	Buen modelo
FE	1	Coincidencia perfecta entre simulación y observaciones
	0	Las predicciones de la simulación son tan precisas como el promedio de los datos observados
	< 0	La media de las observaciones da una mejor predicción que la simulación
Índice d	0	No hay concordancia
	> 0,65	Aceptable
	1	Concordancia entre datos simulados y observados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones Ambientales

La temperatura media diaria durante la temporada de crecimiento del cultivo fue de 27,8 °C; la media diaria mínima y máxima fueron de 22,6 °C y 29,9 °C respectivamente, estas variables se recopilaron desde el 09/09/2022 al 16/11/2022 (Figura 3). Con respecto a los datos de lluvia la cantidad total registrada fue de 185.5 mm en todo el periodo de evaluación, donde los mayores registros hídricos se registró el 26/09/2022 y 07/10/2022 respectivamente. El comportamiento de las variables meteorológicas durante el ciclo de del cultivo provocaron una tasa de evaporación de 4062 mm día⁻¹, valor ubicado dentro del promedio obtenido por Chérrez (2015), en un estudio

comparativo de diferentes métodos en la obtención de evapotranspiración realizado a la granja Santa Inés UTMACH.

Propiedades físicas del suelo

La calicata se realizó a profundidad de 106 cm, donde se pudieron diferenciar 3 horizontes a las siguientes profundidades: 0 - 21 cm, 21 - 42 cm, 42 - 106 cm. El suelo es de origen aluvial y correspondientes al orden de los Inceptisoles (Villaseñor et al., 2015). Con la relación a la clase textural se clasificó como franco arcilloso en los 2 primeros horizontes (Romero & Garcia, 2021) y franco limoso en el restante.

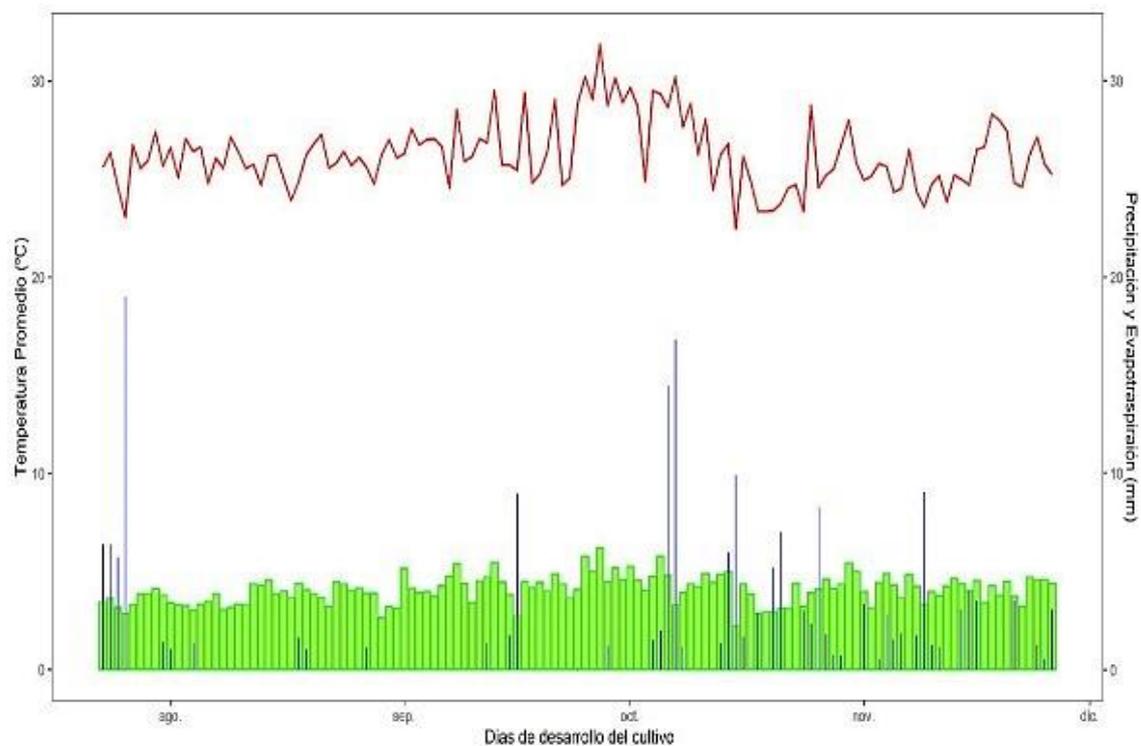


Figura 3. Temperaturas medias diarias del aire (°C) en línea de color rojo, precipitación total diaria (mm) en línea de color azul y evapotranspiración de referencia (mm) barras de color gris, para el periodo de la investigación 23/07/2022 - 19/11/2022.

Para obtención de las propiedades físicas del suelo, se mezclaron los 2 primeros horizontes del suelo ya que dentro de este rango de profundidad se encontraron la mayor cantidad de raíces en el cultivo (Zhang et al., 2021), para el dato de fracción de agotamiento permisible se utilizó el criterio de Allen et al. (1998) en el libro de FAO 56 el cual describe la fracción referencial para el cultivo de maní.

Tabla 3

Propiedades físicas del suelo para la profundidad de mayor actividad radical (0 - 42 cm)

Propiedades	Valor	Unidad
Profundidad	0-42	cm
Textura	Franco -Arcilloso	
Densidad Aparente	1,62	g cm ⁻³
Capacidad de campo (CC)	34,6	(%)
Punto de marchitez (PMP)	18,8	(%)
Punto de saturación	47,3	(%)
Conductividad hidráulica saturada	0,0015	mm sg ⁻¹
Agua disponible (ADT)	158,3	mm m ⁻¹
Fracción de agotamiento permisible	0,5	

Evaluación estadística

Los indicadores de evaluación del modelo (R², RMSE, cv (RMSE), EF, d) mostraron que había una buena coincidencia entre los valores observados y simulados de CC (0,98; 8,50; 13,90; 0,93; 0,98) y Biomasa (0,99; 1,10; 19,90; 0,92; 0,98). Sin embargo, el modelo subestimo la CC entre los 60 y 120 días después de la siembra, esta tendencia del modelo a subestimar la cobertura dosel se presenta también para cultivos como: Algodón (Farahani et al., 2009), Maní bambara (Karunaratne et al., 2011), Papa (Montoya et al., 2015) y Soya (Adeboye et al., 2017) debido a que el modelo no toma en cuenta la aparición de nuevas hojas (filocrono) condición que está muy presente en este tipo de cultivos, esto explica la subestimación de los valores simulados.

En el cultivo de maní la producción de hojas puede continuar hasta la etapa de maduración, la aparición de las hojas se debe al favorecimiento de las condiciones ambientales a la que se expone, a pesar del enfoque de Aquacrop de crecimiento

exponencial y decaimiento de la cobertura dosel, el software pudo simular de manera satisfactoria esta variable, confirmando de esta manera la precisión del modelo.

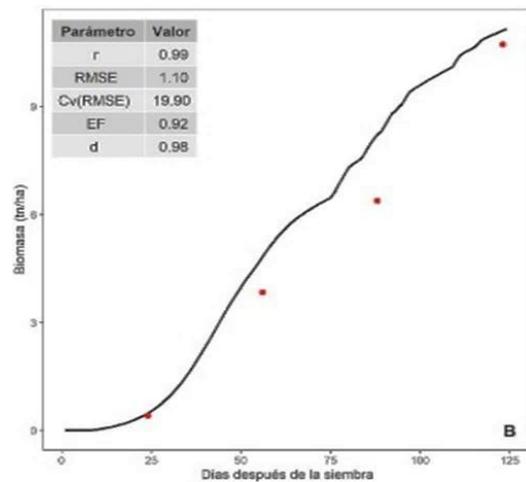
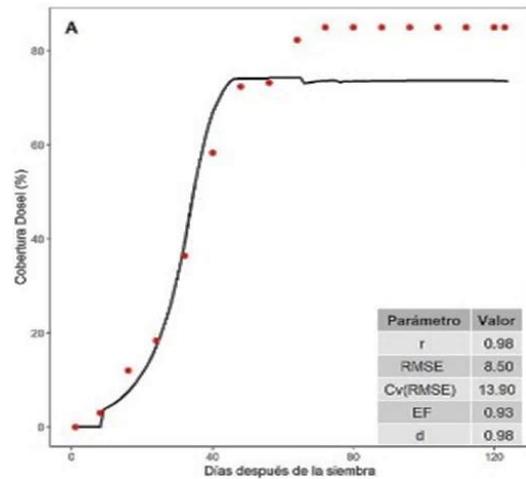


Figura 4. Cobertura dosel (A) y biomasa acumulada (B) simuladas (negro) y observadas (rojo) para maní, proporcionados por Aquacrop (23/07 - 22/11/2022).

Tabla 4

Parámetros de calibración del modelo

Parámetro de entrada	Unidad	Valor de calibración
Método de siembra	-	Directa
Cobertura foliar máxima	%	85
Cobertura del dosel promedio de las plántulas (Cco)	% día ⁻¹	3,30
Coefficiente de crecimiento dosel (CGC)	%	10,2
Coefficiente de disminución del dosel (CDC)	%	0,53
Índice de cosecha de referencia (Hlo)	%	
Productividad del agua normalizada por Eto y CO ₂	g m ⁻²	17
Inicio de Floración	días	45
Fecha de siembra	-	23/07/2022
Densidad de plantación	m ²	12
Días a la germinación	día	8
Duración de la Floración	día	35
Días a la maduración	día	124
Profundidad efectiva máxima de las raíces	cm	32
Biomasa	(t ha ⁻¹)	10,732
Rendimiento	(t ha ⁻¹)	3,022

Para biomasa, la calibración del modelo mostró una buena coincidencia entre los valores simulados y observados, 3 de los 4 indicadores estadísticos mostraron un buen ajuste, donde el modelo en este caso tendió a sobreestimar levemente la biomasa simulada, viéndose afectado también el rendimiento del grano simulado sobreestimándolo en un 13% más que el dato obtenido en campo, ubicando esta variación dentro del criterio de Farahani (2009) y Steduto (2009) los cuales mencionan que diferencias de $\pm 10\%$ son precisas, mientras que las diferencias de $\pm 20\%$ aceptables, pudiendo decir que el modelo simuló el rendimiento con buena precisión de esta variable, hay que tener en cuenta que las simulaciones del contenido de humedad del suelo no se consideraron ni para la calibración ni para la validación dado que la humedad real del suelo dentro de la zona de raíces no se pudieron medir con precisión.

Dado que Aquacrop simuló con una buena precisión las variables de cobertura dosel, biomasa y rendimiento, se puede inferir que es un modelo fiable para simular este tipo de variables.

Con respecto a la evapotranspiración el modelo no sobreestimo los valores de ET finales, el valor acumulado observado fue de 515.868 mm, mientras que el simulado fue de 487 mm, una de las características relevantes de Aquacrop es la separación de la evapotranspiración en evaporación (Es) y transpiración (Tr) basado en un modelo de cobertura dosel simple (Vanuytrecht et al., 2014), dado que el modelo subestimo la

cobertura dosel la cual es proporcional a la transpiración (Tr) el valor de evaporación (Es) sería el parámetro subestimado el cual explica la variación.

Tabla 5

Biomasa, rendimiento de grano y evapotranspiración simulados y observados para el maní durante la calibración y prueba del modelo

	Biomasa (t ha ⁻¹)	Rendi- miento (t ha ⁻¹)	Evapotrans- piración (mm)
Simulado	11,160	4,414	487,000
Observado	10,732	3022	515,868
Diferencia (%)	4,28	13,92	-28

Las comparaciones entre los rendimientos simulados por el modelo y los rendimientos obtenidos indican que es posible lograr diferentes niveles de producción reales al estimado, también que los valores de producción pueden considerarse como valores de referencia ya que son muy variables, esto debido a los diferentes ambientes que se presentan en las diferentes regiones productivas.

En el caso de la producción real obtenida a nivel de investigación, el dato obtenido difiere del simulado debido a la alta variabilidad empírica de la misma, sumándose también a que el modelo no considera el nivel de fertilidad de los suelos, presencia de plagas y enfermedades, en todo caso este nivel de producción simulado puede resultar útil como guía orientativa en las prácticas de manejo de los cultivos.

Tabla 6

Rendimientos potenciales, en años secos y húmedos simulados con Aquacrop, rendimientos experimentales máximos obtenidos a partir de investigaciones similares

Cultivo	PSm (t ha ⁻¹)	PO (t ha ⁻¹)	Fuente	Año	PSm (t ha ⁻¹)	PRI (t ha ⁻¹)
Maní	4,414	3,022	(Chibarabada et al., 2020)	Seco	2,874	2,900
			(Khov et al., 2017)	Húmedo	1,29	1,23

Donde: PSm es producción simulada; PO es producción observada; PRI es producción a nivel de investigaciones.

CONCLUSIONES

Durante la calibración y modelización del máximo rendimiento del cultivo de maní, el modelo simuló de manera aceptable las observaciones realizadas en campo de cobertura dosel (CC) y biomasa acumulada, aunque tendió a subestimar la cobertura dosel al momento de alcanzar la máxima cobertura observable, este fenómeno se atribuyó a que no toma en cuenta la aparición de hojas nuevas,

el modelo no sobreestimó la evapotranspiración en la simulación. En general, el modelo mostró un buen potencial para simular las variables de cobertura dosel, biomasa y rendimiento, sin embargo, antes de poder aplicar el modelo es necesario seguir probando su respuesta ante diferentes climas y suelos de la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O., & Prasad, K. (2017). Modelling of Response of the Growth and Yield of Soybean to Full and Deficit Irrigation by Using Aquacrop. *Irrigation and Drainage*, 66(2), 192–205.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration. *Irrigation and Drainage*, 300(56), 300.
- Allen, R., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J. B., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., & Elliott, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81(1–2), 1–22.
- Chérrez, T. (2015). Análisis comparativo en la aplicación de diversos métodos para el cálculo de la evapotranspiración en un mismo escenario. Escuela Politécnica del litoral.
- Chibarabada, T., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2017). Expounding the value of grain legumes in the semi- and arid tropics. *Sustainability (Switzerland)*, 9(1).
- Chibarabada, T., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2020). Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281(November 2019), 107850.
- Cisneros, R. (2003). Apuntes de la materia Riego y Drenaje.

- Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, 164.
- Farahani, H. J., Izzi, G., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of the aquacrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101(3), 469–476.
- González, O., Florido, R. N., & Varela, M. (2018). Aplicaciones de la modelación matemática y la simulación de cultivos agrícolas en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 121–126.
- INIAP. (2004). Guía del cultivo de mani para las zonas de Loja y El Oro. In *Programa De Modernización De Los Servicios Agropecuarios: Vol. Boletín* 314.
- Jones, J., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Muñoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C., & Wheeler, T. R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240–254.
- Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. In *European Journal of Agronomy* (Vol. 18, Issues 3–4).
- Karunaratne, A. S., Azam-Ali, S. N., Izzi, G., & Steduto, P. (2011). Calibration and validation of fao-aquacrop model for irrigated and water deficient bambara groundnut. *Experimental Agriculture*, 47(3), 509–527.
- Khov, S., Vot, C., Hornbuckle, J., Inthavong, I., Oeurng, C., Sengxua, P., Sihathep, V., Song, L., & Eberbach, P. (2017). Calibration and validation of AquaCrop for irrigated peanut (*Arachis hypogaea*) in lowland rice systems of southern Laos. *Proceedings - 22nd International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM 2017, December*, 223–229.
- Lavado, W., Lhomme, J. P., Labat, D., Guyot, J. L., & Boulet, G. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO-56 Penman-Monteith) con limitados datos climáticos en la cuenca andina amazónica Peruana. *Revista Peruana Geotmosférica*, 43(4), 31–43.
- Lorite, I. J., Garcia-vila, M., & Fereres, E. (2015). *AquaCrop-GIS* (Issue July).
- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J. F., Córcoles, J. I., & Domínguez, A. (2015). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 164, 267–280.
- Rauff, K., & Bello, R. (2015). A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. *Agricultural Sciences*, 06(09), 1098–1105.
- Robertson, M. J., Carberry, P. S., Huth, N. I., Turpin, J. E., Probert, M. E., Poulton, P. L., Bell, M., Weight, G. C., Yeates, S. J., & Brinsmead, R. B. (2002). Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research*, 207(1).
- Romero, I., & Garcia, R. (2021). Diagnostico de los predios agropecuarios que conforman la granja santa ines de la utmach. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(3), 191–200.
- Saxton, K. (2002). *SPAW* (pp. 1–22).
- 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(3), 426–437.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., García Vila, M., & Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model.
- Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la Provincia de El Oro. *Cumbres*, 1(2), 28–34.
- Villaseñor Ortiz, D. (2016). Fundamentos y procedimientos para análisis físicos y morfológicos del suelo. In *Universidad Técnica de Machala*.
- Zhang, K., Liu, Y., Luo, L., Zhang, X., Li, G., Wan, Y., & Liu, F. (2021). Root traits of peanut cultivars with different drought resistant under drought stress at flowering and pegging phase. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 71(5), 363–376.