

## Estimación del rendimiento de la soya (*Glicine max*) para el escenario climático SSP2-4.5

### Estimation of soybean (*Glicine max*) yield the SSP2-4.5 climate scenario



<https://cu-id.com/2177/v33n4e09>

Felicita González-Robaina\*, Enrique Cisneros-Zayas, Carmen Duarte-Díaz, Yoima Chaterlán-Durruthy, Julián Herrera-Puebla

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

**RESUMEN:** Para analizar los diferentes impactos del cambio climático y debido a la alta incertidumbre respecto a las condiciones climáticas futuras se aconseja trabajar con escenarios, los cuales son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro. El objetivo de este estudio es predecir los rendimientos de la soya sembrado en suelo Ferralítico Rojo en la región de Alquizar ante el escenario de cambio climático SSP2-4.5 de los modelos Hadgem3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 con la utilización del modelo de simulación *AquaCrop*. Para la selección de los años hidrológicos se realizó el estudio de una serie de 28 años (2023-2050) para el periodo noviembre-abril (periodo de desarrollo del cultivo) de cada modelo. Se evidencia la posibilidad de alcanzar en la soya rendimientos potenciales entre 2,72 y 3,27 t ha<sup>-1</sup> y una productividad agronómica del agua que varía entre 0,78-0,91 kg m<sup>-3</sup>, si el cultivo no se somete a ningún tipo de limitación salvo la genética vegetal, la radiación solar, la temperatura y las precipitaciones son suficiente en este periodo poco lluvioso. Los mayores rendimientos como promedio fueron simulados por el modelo HadGEM3 con 3,27 t ha<sup>-1</sup>. Si se aplica riego solo para garantizar la germinación de la soya se estiman reducciones con respecto al rendimiento potencial entre 14-95%. El estudio comparativo de los rendimientos en el escenario de cambio climático SSP2-4.5 en los diferentes modelos demuestra la influencia de estas condiciones en la respuesta del cultivo.

**Palabras clave:** cambio climático, modelación, productividad del agua.

**ABSTRACT:** To analyze the different impacts of climate change and due to the high uncertainty regarding future climate conditions, it is advisable to work with scenarios, which are coherent and consistent descriptions of how the Earth's climate system can change in the future. The goal of this study is to predict the yields of soybean planted in Ferralitic Red soil in the Alquizar region under the SSP2-4.5 climate change scenario of the Hadgem3, Mpi-esm1 and Mri-esm2 models with the use of the *AquaCrop* simulation model. To select the hydrological years, a study of a series of 28 years (2023-2050) was carried out for the period November-April (crop development period) for each model. The possibility of achieving potential yields between 2,72 and 3,27 t ha<sup>-1</sup> and an agronomic water productivity that varies between 0,78-0,91 kg m<sup>-3</sup> is evident in soybeans, if the crop is not subjected to any type of limitation except plant genetics, solar radiation, temperature, and rainfall is sufficient in this dry period. The highest average yields were simulated by the HadGEM3 model with 3,27 t ha<sup>-1</sup>. If irrigation is applied only to guarantee soybean germination, reductions with respect to potential yield are estimated between 14-95%. The comparative study of yields in the SSP2-4.5 climate change scenario in the different models demonstrates the influence of these conditions on the crop response.

**Keywords:** Climatic Change, Modeling, Water Productivity.

\*Autora para correspondencia: Felicita González-Robaina, e-mail: [felicita.gonzalez@iagric.minag.gob.cu](mailto:felicita.gonzalez@iagric.minag.gob.cu)

Recibido: 05/03/2024

Aceptado: 05/09/2024

The authors of this work declare no conflict of interests.

**AUTHOR CONTRIBUTIONS:** **Conceptualization:** F. González, E. Cisneros, C. Duarte. **Data curation:** F. González, E. Cisneros, Y. Chaterlán. **Formal analysis:** F. González, J. Herrera. **Investigation:** F. González, E. Cisneros, Y. Chaterlán. **Methodology:** F. González, E. Cisneros, C. Duarte, Y. Chaterlán, J. Herrera. **Software:** F. González, E. Cisneros, Y. Chaterlán. **Supervision:** F. González, E. Cisneros, C. Duarte. **Validation:** F. González, E. Cisneros. **Writing-original draft:** F. González, E. Cisneros. **Writing-review & editing:** F. González, E. Cisneros, C. Duarte, Y. Chaterlán, J. Herrera.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

Los escenarios de cambio climático son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro (Escoto *et al.*, 2017). Con el objetivo de mejorar el marco de análisis, la evaluación de los impactos del cambio climático y lograr una visión más interdisciplinaria en los últimos años se han desarrollado nuevos escenarios (IPCC, 2014).

Los SSP (Trayectorias Socioeconómicas Compartidas, por el inglés Shared Socio Economic Pathways) describen 5 vías alternativas de la sociedad según la implementación o ausencias de políticas para frenar el cambio climático, contemplando diferentes opciones de desarrollo y emisiones en el año 2100 (SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 y SSP5) (Escoto *et al.*, 2017; OFA & CC, 2023).

Según Morán & Novillo (2022) el escenario SSP2 asume un nivel intermedio de desafíos, donde sus asunciones se encuentran entre las que corresponden a la SSP1 (con narrativa de sustentabilidad, bajos niveles de desafíos de mitigación y adaptación) y SSP3 (con narrativa de fragmentación, nivel alto de desafíos para la adaptación y mitigación).

En particular, el SSP2-4.5 como actualización del escenario RCP4.5, con un forzamiento radiactivo adicional de 4,5 W/m<sup>2</sup> para el año 2100 representa la trayectoria media de futuras emisiones de gases de efecto invernadero. Este escenario asume que se están tomando medidas de protección climática. El cambio porcentual promedio de la precipitación para el escenario SSP2-4.5 diverge en la proyección de horizonte medio centrado al 2050, y se mantiene entre 0 y +20% hasta el 2080 donde se presenta un cambio de +45% indicando que hay un aumento de la precipitación. Mientras que el cambio de temperatura promedio en las proyecciones de horizonte medio centrado al 2050 es +1°C y al horizonte lejano 2085 es +1.6°C, evidenciando que ante este escenario el aumento de la temperatura del aire es notable (Bruno, 2023).

Según IPCC (2021) este escenarios (SSP2-4.5) presenta emisiones de GEI intermedias y emisiones de CO<sub>2</sub> que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo, y es sumamente probable que se supere un calentamiento global de 2 °C.

En Cuba los estudios desarrollados por Planos *et al.* (2012) demostraron que se han observado variaciones climáticas importantes, entre las que puede citarse: “se manifiesta una tendencia al aumento de las precipitaciones en el período estacional poco lluvioso. Las diferencias entre los valores de la media y la mediana, reafirman el incremento de las anomalías extremas en la parte occidental y central del país”.

Los modelos dinámicos de simulación permiten investigar las consecuencias de posibles escenarios futuros y permite prepararse para los cambios antes de que ocurran. El modelo *AquaCrop* liberado por la FAO Raes *et al.* (2012) puede usarse como herramienta computacional para analizar diferentes contextos agrícolas en ciclos y localidades diferentes. Esta nueva propuesta de la FAO proporcionará a los profesionales una herramienta más sólida para: evaluar la incidencia de la escasez de agua en la producción de cultivos, investigar el impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos, mejorar las estrategias de gestión para aumentar la productividad y el ahorro del agua, entre otros (Steduto *et al.*, 2009).

Boligon *et al.* (2017) se apoyaron en el modelo *AquaCrop* para analizar el desempeño agronómico de la soya (*Glicine max* L.) en diferentes escenarios climáticos en Brasil. Simularon duración del ciclo, la productividad del agua en base a la evapotranspiración, los requerimientos de riego e índice de cosecha en diferentes escenarios climáticos, con proyecciones a corto (2016-2035) y mediano plazo (2046-2065). La duración de los ciclos de la soya tiende a decrecer en las regiones más frías, mientras que la productividad del agua debe incrementarse aun sin existir demandas de riego en estos escenarios futuros.

El modelo *Aquacrop* fue validado por Morla & Giayetto (2012) para la soya en la región de Río Cuarto, en el centro-sur de Córdoba, Argentina. Rendimientos de 1,9, 3,1 y 5,3 t ha<sup>-1</sup> fueron simulados para año seco, medio y húmedo, respectivamente.

González *et al.* (2019) calibraron y validaron el modelo *AquaCrop* para soya en suelo Ferralítico Rojo en Alquizar, provincia Artemisa, Cuba. Los resultados de la calibración del modelo permitieron optimizar los parámetros fundamentales de suelo y cultivo para su aplicación en las condiciones de estudio.

Isla (2019) utilizó el modelo *AquaCrop* para predecir fechas óptimas de siembra y los rendimientos de la soya en suelo Ferralítico Rojo compactado en la Llanura Habana-Matanzas ante escenarios B2 de cambio climático. Los resultados muestran al modelo como una alternativa viable para seleccionar fechas de siembra óptima, reproducir la fenología y productividad del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y variabilidad climática.

El objetivo de este estudio es predecir los rendimientos de la soya sembrado en suelo Ferralítico Rojo en la región de Alquizar ante el escenario de cambio climático SSP2-4.5 de los modelos Hadgem3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 con la utilización del modelo de simulación *AquaCrop*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

$$P = (m - 0.3/n + 0.4) \times 100$$

### Localización del área de estudio

El modelo fue calibrado y validado para el cultivo de soya por [González et al. \(2019\)](#) con datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (enero-abril) en el período 1980-1990, bajo un sistema de riego por aspersión en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric) en Alquizar, coordenadas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' O, altura sobre el nivel medio del mar 6 m, 12 km de la costa.

Estos experimentos se llevaron a cabo con el objetivo de estudiar las necesidades hídricas y la respuesta al agua de la variedad de soya G-7R-315 ([Castellanos et al., 1984](#)). La fecha de siembra fue 6 enero, con temperaturas umbrales de 10 a 30 °C, la madurez se alcanzó 112 días después de la siembra, la densidad de población fue 370 370 plantas ha<sup>-1</sup> y el rendimiento máximo fue 3,49 t ha<sup>-1</sup>.

Los parámetros de entrada del cultivo de soya al modelo *AquaCrop*, obtenidos en estudios precedentes de [González et al. \(2019\)](#) sirvieron de entrada a todas las simulaciones que se realizaron en este estudio.

El índice de cosecha (HI) considerado para la soya fue de 35%, este valor se encuentra en el rango (0,3 a 0,5) que propone ([Wani et al., 2012](#)).

Las propiedades físicas fundamentales para cada capa del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado han sido actualizadas por [Cid et al. \(2011\)](#) y publicadas por [González et al. \(2019\)](#); y conforman el fichero de suelo que se utilizó para todas las corridas del modelo.

### Procesamiento y extracción de la información de cambio climático

Para la obtención de estos datos se hizo uso de los valores climáticos del escenario SSP2-4.5 de los modelos Hadgem3 (Hadley Centre Global Environment Model versión 3), Mpi-esm1 (Max Planck Institute Earth System Model) y Mri-esm2 (Meteorological Research Institute), que presenta una resolución de 125 x 125 km. Se tomaron las variables: temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación, que representa el clima futuro para el área de estudio, según recomendaciones del [Instituto de Meteorología-Cuba \(2023\)](#).

Para la selección de los años hidrológicos se realizó el estudio de una serie de 28 años (2023-2050) para el periodo noviembre-abril (periodo estacional poco lluvioso que coincide con la etapa de desarrollo de la soya estudiada) de cada modelo, donde se determinó la probabilidad empírica a partir de la expresión:

m: número de orden.

n: número de miembros de la serie.

Se clasificaron cada uno de los periodos de la serie en función de su respectiva probabilidad. El de probabilidad 25% denota un año húmedo, el 50% medio y 75% seco, según [Pérez & Álvarez \(2005\)](#).

### Módulo de manejo del Cultivo

Para la simulación, el manejo del cultivo se consideró bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua y nutrientes y que las únicas variables que afectaron el desarrollo fueron las condiciones climáticas del escenario climático SSP2-4.5 y los 3 modelos seleccionados (Hadgem3, Mpi-esm1 y Mri-esm2). Se optó por no evaluar de manera particular ninguna reducción del crecimiento asociada al nivel de fertilización, evitando la mayor complejidad que supone analizar la interacción entre la disponibilidad de agua y la nutrición de los cultivos.

### Manejo del riego

Se utilizó el programa CROPWAT versión 8.0 para la estimar las necesidades hídricas de la soya y el manejo del riego para cada periodo climático considerando el escenario SSP2-4.5 de los modelos Hadgem3, Mpi y Mri-esm2. Este software permite gestionar programas de riego tanto en condiciones de secano como de irrigación, por lo que se empleó para determinar la evapotranspiración de referencia por el método de la FAO Penman-Monteith.

### Condiciones iniciales

Se consideró un contenido de agua en el suelo de 0,35 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, que representa el 90% del contenido de agua en el suelo a capacidad de campo 0,39 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> hasta una profundidad de 0,40 m.

### Aplicaciones

Se simuló la producción potencial ajustada para el escenario SSP2-4.5 de los modelos Hadgem3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 en los tres años seleccionados del 2023-2050 (húmedo, medio y seco). Los resultados que se presentan corresponden a las salidas del modelo *AquaCrop* una vez se han incorporado los cambios en el clima que se prevén de acuerdo al escenario de cambio climático contemplado. Posteriormente se simuló la producción de soya aplicando riego solo para garantizar la germinación de este cultivo para el escenario SSP2-4.5, comparando las salidas de los 3 modelos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando los valores climáticos del escenario SSP2-4.5 de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, se presentan los resultados que representa el clima futuro para el área de estudio para cada uno de los modelos.

En la [Tabla 1](#) se muestra la selección de los años hidrológicos en función de su respectiva probabilidad (probabilidad 25% denota un año húmedo, el 50% medio y 75% seco) para el periodo 2023-2050 (noviembre-abril, periodo de desarrollo del cultivo) y valores de las precipitaciones para el escenario SSP2-4.5 y los modelos Hadgem3, Mpi-esm1 y Mri-esm2.

Bajo el escenario SSP2-4.5 puede observarse que el comportamiento de las precipitaciones varió entre 319,73-532,67 mm para el periodo estudiado, diferenciándose por modelo. Para el periodo de desarrollo del cultivo (noviembre-abril) los modelos Hadgem3 y Mpi-esm1 estiman valores de precipitación superiores al modelo Mri-esm2 entre un 5-18%, las mayores diferencias se tienen para el 50% de probabilidad de ocurrencia (13 y 18%).

En la [Figura 1](#) se comparan las precipitaciones anuales estimadas bajo el escenario SSP2-4.5 para el periodo 2023-2050 de los tres modelos estudiados, puede observarse que el comportamiento de las precipitaciones varió entre 1241,7 y 2216,18 mm por año. De los 3 modelos el Mpi-esm1 estima los valores más altos de precipitaciones en 17 de los 28 años estudiados, y en 23 años valores por encima de los 1500 mm. Mientras que el modelo HadGEM3 estima 9 años menores a 1500 mm. El máximo valor lo estima el modelo Mri-esm2 con 2216,18 mm para el

año 2037, mientras que en 10 años los estimados de precipitaciones fueron inferiores a 1500mm.

Las estimaciones del promedio anual de los 28 años por el modelo HadGEM3 es de 1619,23 mm, mientras que el modelo Mpi-esm1 estima 1714,57 mm y el Mri-esm2 1596,19 mm, todos por encima entre 16 y 22% al promedio anual actual de 1335 mm para Cuba según nuevo isoyético ([Servicio Hidrológico Nacional, 2006](#)).

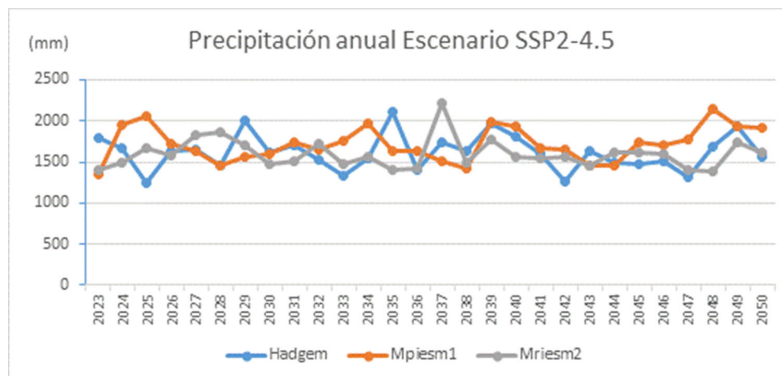
En la [Figura 2](#) se muestra el balance hídrico en el periodo de crecimiento definido para la soya (noviembre- abril) entre 2023-2050 para el SSP2-4.5 del modelo Hadgem3. A pesar de que en los años seleccionados las precipitaciones anuales superan los 1400 mm en los tres modelos, en el periodo de crecimiento del cultivo de la soya no se aprecia igual comportamiento. Como se observa en la [Figura 4A](#) en el año hidrológico húmedo (25% probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones), solo en los meses de diciembre y enero, las precipitaciones superan la evapotranspiración del cultivo, en el 50 y 75 % de probabilidad solo en un mes, por lo que pudieran esperarse un mayor número de riegos unido a una norma neta total superior para este escenario SSP2-4.5. Similar análisis se realizó para el resto de los modelos, mostrando igual comportamiento.

En las [Tablas 2, 3 y 4](#) se presentan los resultados obtenidos en el Cropwat de necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo de la soya para el escenario SSP2-4.5 de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2.

El número de riegos para la soya varió entre 9 y 10 riegos con normas parciales entre 24 y 30 mm y normas totales entre 246,2 y 272,7 mm, dependiendo del año y el modelo utilizado.

**TABLA 1.** Selección de los años hidrológicos en función de su respectiva probabilidad (probabilidad 25% denota un año húmedo, el 50% medio y 75% seco) para el periodo 2023-2050

Prob. (%)	Modelo					
	Hadgem3		Mpi-esm1		Mri-esm2	
	Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)
25	2043-2044	532,67	2034-2035	567,36	2038-2039	482,80
50	2029-2030	446,85	2030-2031	421,25	2042-2043	366,02
75	2030-2031	339,27	2040-2041	346,89	2034-2035	319,73



**FIGURA 1.** Comparación entre las precipitaciones anuales para el periodo 2023-2050 bajo el escenario SSP2-4.5 de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2.

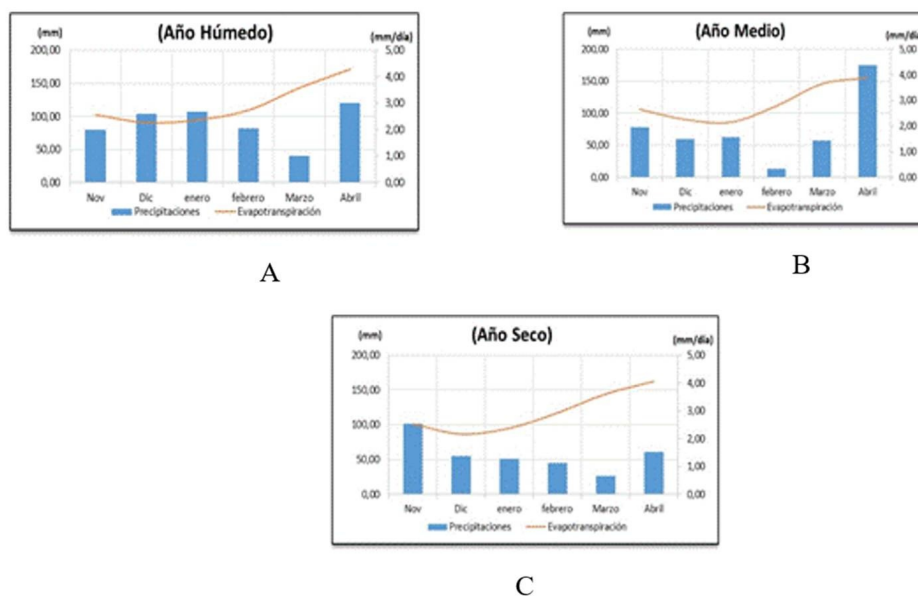


FIGURA 2. Balance Hídrico en el período noviembre- abril entre 2023-2050 para el escenario SSP2-4.5 del modelo Hadgem3 en la zona de estudio.

TABLA 2. Necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo de la soya para el escenario SSP2-4.5 del modelo HadGEM3 en los períodos analizados, según el software Cropwat

Húmedo (2043-2044)		Medio (2029-2030)		Seco (2030-2031)	
Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)
1	26.4	1	26.3	1	26.3
35	25.6	35	26.2	32	25.0
48	27.6	45	28.5	45	26.2
59	28.0	55	27.2	56	28.1
68	26.4	65	28.6	65	29.1
76	28.1	74	27.1	74	29.5
84	28.5	83	26.9	83	27.1
93	29.8	91	28.3	91	29.0
101	26.7	100	29.0	99	26.6
<b>Norma total (mm)</b>	<b>247.2</b>		<b>248.2</b>		<b>246.9</b>
<b>No. riegos</b>	<b>9</b>		<b>9</b>		<b>9</b>

TABLA 3. Necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo de la soya para el escenario SSP2-4.5 del modelo Mpi-esm1 en los períodos analizados, según el software Cropwat

Húmedo (2034-2035)		Medio (2030-2031)		Seco (2040-2041)	
Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)
1	26.4	1	26.3	1	26.3
35	26.0	21	24.0	35	25.7
48	28.6	41	27.9	48	28.5
59	27.0	54	27.5	59	27.8
69	27.0	65	29.3	69	28.2
79	28.9	75	29.6	78	26.2
87	27.6	84	27.3	86	27.2
95	28.0	93	28.1	95	28.7
105	26.7	103	27.5	106	28.0
<b>Norma total (mm)</b>	<b>246.2</b>		<b>247.4</b>		<b>246.6</b>
<b>No. riegos</b>	<b>9</b>		<b>9</b>		<b>9</b>

**TABLA 4.** Necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo de la soya para el escenario SSP2-4.5 del modelo Mri-esm2 en los períodos analizados, según el software Cropwat

Húmedo (2038-2039)		Medio (2042-2043)		Seco (2034-2035)	
Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)
1	26,4	1	26,3	1	26,3
32	25,5	35	25,7	28	25,3
46	28,9	47	26,2	42	27,4
58	26,7	58	27,1	52	27,6
68	29,5	66	26,8	62	26,7
76	28,5	73	26,4	70	26,4
84	27,4	82	27,4	78	27,7
93	28,3	90	29,5	86	28,6
103	27,6	99	27,3	95	30,0
		111	26,2	105	26,9
<b>Norma total (mm)</b>	<b>248,7</b>		<b>268,9</b>		<b>272,7</b>
<b>No. riegos</b>	<b>9</b>		<b>10</b>		<b>10</b>

Los resultados obtenidos por [Castellanos et al. \(1984\)](#), para época de siembra similar a la del estudio, informan que fue necesario aplicar 14 riegos con una norma neta total de 259 mm y un aporte por lluvias de 117,6 mm. Además, refieren que para obtener altos rendimientos en los suelos Ferralíticos Rojos la humedad antes del riego no debe descender del 85% de la Cc en la capa de 0-40 cm de profundidad.

En la [Tabla 5](#) se presentan los resultados de la simulación con *Aquacrop* para la soya. Primeramente, se simuló una producción potencial, máximo rendimiento posible sin ningún tipo de limitación, salvo la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura, ajustada para el escenario SSP2.4.5 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 en los tres años seleccionados del período 2023-2050 (húmedo, medio y seco).

Los valores de rendimiento (2,72-3,27 t ha<sup>-1</sup>) y productividad del agua (0,78-0,91 kg m<sup>-3</sup>) están en el intervalo publicado en trabajos precedentes de [González et al. \(2014\)](#) y [González et al. \(2015\)](#). En el caso particular del rendimiento en experimentos de campo que sirvieron de fuente para la calibración del modelo [Castellanos et al. \(1984\)](#), este varió entre 0,42 para los tratamiento en secano y 3,49 t ha<sup>-1</sup> para el mejor tratamiento de riego, mientras que la productividad en base a la evapotranspiración obtenida en este trabajo fue superior en todos los años al promedio obtenido por estos autores antes citado (0,67 kg m<sup>-3</sup>).

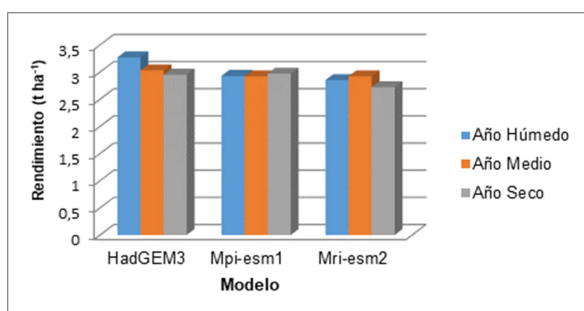
Los mayores rendimientos como promedio, simulados con *Aquacrop*, fueron los obtenidos con los datos climáticos del modelo HadGEM3 con 3,27 t ha<sup>-1</sup> ([Figura 3](#)). En los tres años seleccionados para este modelo fue necesario aplicar 9 riegos para lograr rendimientos superiores a las 2,95 t ha<sup>-1</sup>. Se evidencia la posibilidad de alcanzar para la soya rendimientos de 3 t ha<sup>-1</sup> aun por las condiciones impuestas por el cambio climático y siempre que el cultivo no tenga limitaciones de riego, ataques de plagas, calidad de la semilla, entre otros.

Según [Merino \(2006\)](#), en Cuba el rendimiento agrícola de la soya oscila entre 0,98 y 3 t ha<sup>-1</sup>, en dependencia de la variedad empleada y la región. En la época de siembra de invierno y en condiciones de suelos pardos con carbonatos de la zona central de Cuba y con el cultivar Conquista se alcanzó rendimientos agrícolas de 2,54 t ha<sup>-1</sup>.

En la [Figura 4](#) se muestra las salidas del modelo *Aquacrop* para el escenario SSP2-4.5 del modelo Mri-esm2 (2038-2039, año húmedo), donde se obtuvo el rendimiento más bajo de los años húmedos de 2,85 t ha<sup>-1</sup>, con 286,1 mm de precipitaciones y donde fue necesario aplicar 248,7 mm por riego. Se aprecia una disminución de la transpiración a los 50 días de plantada la soya, con un 98% de cierre estomático, al parecer por exceso de precipitaciones, ya que se aplicó un riego de 28,9 mm a los 46 días de plantada la soya y posteriormente llovió 5 días seguidos, coincidiendo con el inicio de la floración.

**TABLA 5.** Resultados de la simulación con AquaCrop para el escenario SSP2-4.5 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, en los períodos seleccionados, para el cultivo de Soya.

Modelo	Año	Biomasa (t ha <sup>-1</sup> )	Rend. (t ha <sup>-1</sup> )	WP <sub>ET</sub> (kg m <sup>-3</sup> )	ET <sub>o</sub> (mm)	No. Riegos	Riego (mm)	Prec. (mm)
HadGEM3	Húmedo (2043-2044)	9,27	3,27	0,91	367,0	9	247,2	329,1
	Medio (2029-2030)	8,79	3,03	0,90	352,2	9	248,2	275,6
	Seco (2030-2031)	9,09	2,95	0,81	366,0	9	246,9	165,8
Mpi-esm1	Húmedo (2034-2035)	8,82	2,93	0,85	351,4	9	246,2	385
	Medio (2030-2031)	8,87	2,92	0,85	354,9	9	247,4	226,7
	Seco (2040-2041)	9,21	2,97	0,86	354,6	9	246,6	149,1
Mri-esm2	Húmedo (2038-2039)	8,82	2,85	0,80	363,0	9	248,7	286,1
	Medio (2042-2043)	9,06	2,92	0,83	390	10	268,9	215,5
	Seco (2034-2035)	8,6	2,72	0,78	360,8	10	272,7	183,3



**FIGURA 3.** Comparación de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, utilizados en la predicción del rendimiento para soja en los periodos seleccionados.

Las máximas producciones se obtienen cuando el cultivo puede transpirar a su máxima tasa, es decir, cuando no se produce cierre de estomas y por lo tanto reducción en la transpiración simultáneamente con la asimilación de CO<sub>2</sub>. Las tasas de estos últimos dos procesos están fuertemente ligadas y por tanto el cálculo de la transpiración por el dosel del cultivo es una ruta directa para el cálculo de la asimilación del cultivo (Isla, 2019).

Según Márquez y Enriquez (1984), citado por Herrera *et al.* (2011), en estudios realizados en condiciones experimentales similares a este estudio, la soja es un cultivo que muestra sensibilidad al exceso de humedad, puede perder hasta 20% de su rendimiento con 48 horas y hasta el 40% con 72 horas de inundación; su productividad dependerá entonces en gran medida del buen manejo del riego. Los efectos por exceso de humedad se traducen en una disminución de los rendimientos del cultivo. El

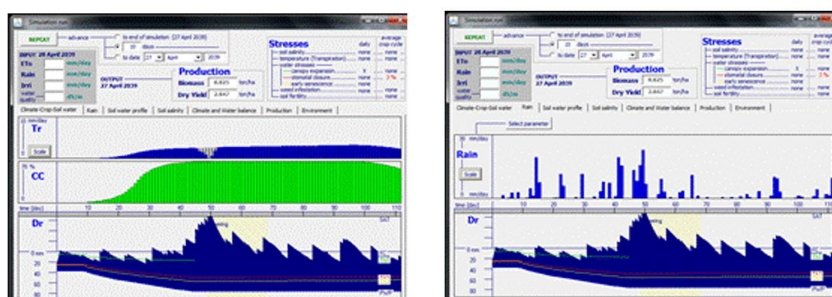
decrecimiento de producción en la soja con 4 días de inundación está en el orden del 50% y las pérdidas más severas ocurren en la etapa vegetativa-floración.

Cuando el suelo se satura por un período prolongado el agua llena todos los poros desalojando al aire. Esto causa la ausencia de oxígeno en el suelo y en la mayoría de las plantas, una asfixia celular a nivel radical, perdiendo funcionalidad sus raíces, la reducción del crecimiento por deficiencias de nitrógeno y si se prolonga por mucho tiempo puede causar la muerte de la planta (Gardner *et al.*, 1999).

En la [Tabla 6](#) se presentan los resultados de la simulación con *Aquacrop* para la soja cuando se aplicó un riego (10 mm) para garantizar la germinación, bajo el escenario SSP2-4.5 de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 en los años húmedos y medios, así como la reducción del rendimiento con respecto al potencial obtenido en cada año que aparece en la [Tabla 5](#).

En el modelo HadGEM3 para el año húmedo (2043-2044) los rendimientos se estiman en 2,09 t ha<sup>-1</sup> y la biomasa 7,02 t ha<sup>-1</sup>, lográndose una productividad de 0,68 kg m<sup>-3</sup>, con reducciones con respecto al rendimiento potencial de un 36% ([Figura 5](#)).

A los 20 días se presenta un estrés del 100% de expansión foliar y 31% cierre estomas, en todo este período solo precipitó 25,9 mm. A los 40 días 16% de expansión foliar, a los 80 días 63% de cierre estomas y 16% senescencia temprana y a los 100 días 25% de cierre de estomas. En todo el ciclo del cultivo como promedio la soja fue sometido a estrés de un 25% de expansión foliar y 16% de cierre de estomas, afectando el rendimiento significativamente.



**FIGURA 4.** Salida del modelo *Aquacrop* para rendimiento potencial de la soja en el escenario SSP2-4.5 del modelo Mri-esm2 (2038-2039, año húmedo).

**TABLA 6.** Resultados de la simulación con *AquaCrop* para el escenario SSP2-4.5 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, en los años húmedos y medios, así como la reducción del rendimiento con respecto al potencial para el cultivo de soja.

Modelo	Año	Biomasa (t ha <sup>-1</sup> )	Rend. (t ha <sup>-1</sup> )	WP <sub>ET</sub> (kg m <sup>-3</sup> )	ET <sub>o</sub> (mm)	Prec. (mm)	Reducción Rendimiento (%)
HadGEM3	Húmedo (2043-2044)	7,02	2,09	0,68	367,0	329,1	36
	Medio (2029-2030)	<b>2,03</b>	<b>0,148</b>	<b>0,12</b>	352,2	275,6	95
Mpi-esm1	Húmedo (2034-2035)	8,36	2,51	0,82	351,4	385,0	14
	Medio (2030-2031)	5,46	1,55	0,60	354,9	226,7	47
Mri-esm2	Húmedo (2038-2039)	7,5	2,22	0,74	363,0	286,1	22
	Medio (2042-2043)	2,66	0,32	0,22	390,0	215,5	89



FIGURA 5. Salida del modelo *Aquacrop* para rendimiento de la soja en el escenario SSP2-4.5 del modelo HadGEM3 para el año húmedo (2043-2044).

Para este mismo modelo, pero en el año medio (2029-2030) solo se alcanzó un rendimiento de 0,148 t ha<sup>-1</sup> y biomasa de 2,03 t ha<sup>-1</sup>, con reducciones con respecto al potencial de 95% (Figura 6). Este manejo del riego, unido a las escasas y mal distribuidas precipitaciones provocó agotamiento del agua en el suelo en casi todo el período de desarrollo del cultivo y marcados niveles de estrés. A partir de los 30 días de plantada la soja y hasta los 70 días se estiman valores de estrés entre 66 y 100 % de inhibición de la expansión del dosel vegetal, 48-80% de cierre de estomas y hasta 39% de aceleración de la senescencia como respuesta al estrés hídrico.

La soja tiene dos períodos críticos bien definidos con respecto al requerimiento de agua: desde la siembra a la emergencia, y durante la fase de

formación y desarrollo de los órganos reproductivos (floración, formación y llenado de las vainas). En la fase de germinación tanto el déficit como el exceso de humedad son perjudiciales para la uniformidad de distribución y número de plantas por unidad de superficie. Durante este período, el exceso de agua es mucho más limitante que el déficit (Doorenbos & Kassam, 1986).

Como se observa en la figura 7, para el modelo *Mpi-esml* en el año húmedo (2034-2035), las afectaciones en el rendimiento solo fueron del 14%, estas ocurrieron después de los 80 días de plantada la soja. A los 100 y 110 días el cierre de estomas fue de 84% y la aceleración de la senescencia alcanzó el 50% como respuesta al estrés hídrico, en este periodo las lluvias fueron inferiores a los 13 mm.

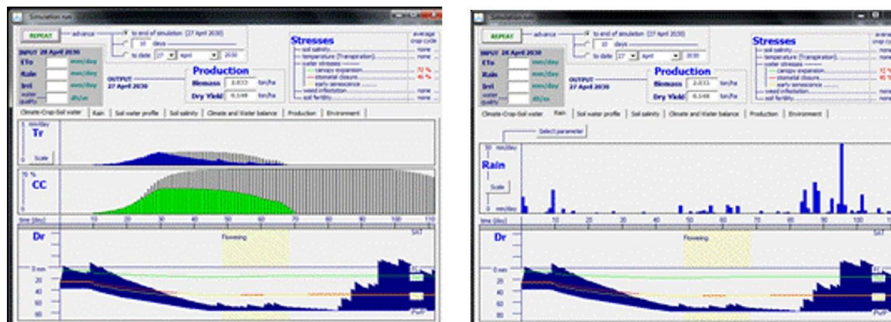


FIGURA 6. Salida del modelo *Aquacrop* para rendimiento de la soja en el escenario SSP2-4.5 del modelo HadGEM3 para el año medio (2029-2030).

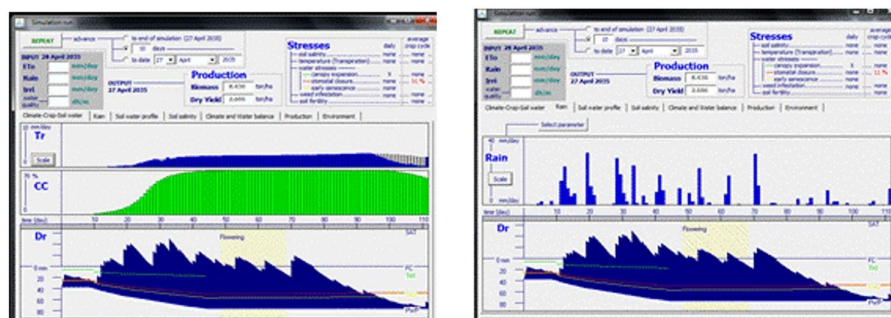


FIGURA 7. Salida del modelo *Aquacrop* para rendimiento de la soja en el escenario SSP2-4.5 del modelo *Mpi-esml* para el año húmedo (2034-2035).



## CONCLUSIONES

- El comportamiento de las precipitaciones anuales bajo el escenario SSP2-4.5 de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 varió entre 1241,7 y 2216,18 mm. De los 3 modelos el Mpi-esm1 estima los valores más altos de precipitaciones en 17 de los 28 años estudiados, y en 23 años valores por encima de los 1500 mm. Mientras que el modelo HadGEM3 estima 9 años menores a 1500 mm. El máximo valor lo estima el modelo Mri-esm2 con 2216,18 mm para el año 2037, mientras que en 10 años los estimados de precipitaciones fueron inferiores a 1500mm.
- Las estimaciones del promedio anual de los 28 años por el modelo HadGEM3 es de 1619,23 mm, mientras que el modelo Mpi-esm1 estima 1714,57 mm y el Mri-esm2 1596,19 mm, todos por encima entre 16 y 22% al promedio anual actual de 1335 mm para Cuba según nuevo isoyético de Cuba.
- A pesar de que en los años seleccionados las precipitaciones anuales superan los 1400 mm para los tres modelos, en el periodo de crecimiento seleccionado para el cultivo de la soya (noviembre-abril) no se aprecia igual comportamiento de las mismas. De manera general, en el año de probabilidad de ocurrencia correspondiente al 25% solo en los meses de diciembre y enero las precipitaciones superan la evapotranspiración del cultivo, en el 50 y 75% solo en un mes, por lo que pudieran esperarse un mayor número de riegos unido a una norma neta total superior para este escenario.
- Los valores de rendimiento simulados ponen de manifiesto que la soya experimenta durante su ciclo biológico condiciones de crecimiento particulares en función del comportamiento de las precipitaciones. Estos valores de producción pueden considerarse como referentes de la capacidad productiva del ambiente de la zona estudiada y pueden resultar de gran utilidad en la programación de riego.
- Si se aplica riego solo para garantizar la germinación de la soya, bajo el escenario SSP2-4.5 de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, se estiman reducciones con respecto al rendimiento potencial entre 14 y 95%.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLIGON, M.R.; AMARAL, F.C.; FREIRA DE SILVA, G.T.: "Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for Southern Brazil", *Revista Ceres*, 64(6): 567-573, Viçosa, 2017.

BRUNO, R.J.E.: "Análisis de fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos CMIP6 para las proyecciones climáticas de temperatura y precipitación en Sudamérica", En: *UNALM, Lima, Peru, noviembre 2022.*, Lima, Perú, p. 57, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.

CASTELLANOS, A.; REY, R.; AMORO, R.: "Efecto del riego sobre el rendimiento de la soya", *Cienc. Tec. Agric. Riego y Drenaje*, 7(2): 39-51, 1984.

CID, G.; BILIR, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, M.E.: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 42-46, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054, 2011, ISSN: 2071-0054.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.: *Yield response to water; Irrigation and Drainage*, Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, Rome, Italy, 193 p., 1986.

ESCOTO, A.; SÁNCHEZ, L.; GACHUZ, S.: "Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social", *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3): 669-693, ISSN: 0186-7210, Publisher: El Colegio de México AC, 2017, ISSN: 0186-7210, DOI: <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>.

GARDNER, C.M.K.; LARYEA, K.B.; UNGER, P.W.: *Soil physical constraints to plant growth and crop production*, Inst. Land and Water Development Division, AGL/MISC/24/99. FAO. Rome, Rome, Italy, 106 p., 1999.

GONZALÉZ, R.F.; CISNEROS, Z.E.; HERRERA, P.J.; LÓPEZ, T.; CID, L.G.: "Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max L*) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico", *Ingeniería Agrícola*, 9(1): 3-13, 2019, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.

GONZÁLEZ, R.F.; HERRERA, P.J.; LÓPEZ, S.T.; CID, L.G.: "Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4): 21-27, 2014, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.

GONZÁLEZ, R.F.; LÓPEZ, S.T.; HERRERA, P.J.: "Indicadores de productividad del agua por cultivos y técnicas de riego en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(4): 57-63, 2015, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.

HERRERA, J.; PUJOL, R.; CID, G.; MÉNDEZ, M.; ALARCÓN, R.: "Problemas del drenaje agrícola en Cuba", *Revista Ingeniería Agrícola*, 1(1): 21-32, 2011, ISSN: 2306-1545.

INSTITUTO DE METEOROLOGÍA-CUBA: "Boletín Agro meteorológico Nacional", 27 al 41(1 al 36): Publisher: Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba., 2023.

- IPCC: *Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Cambio climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*, Inst. Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), Cambridge, United Kingdom, 58 p., 2014.
- IPCC: *Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 40, ISBN: 978-92-9169-358-0 p., 2021.
- ISLA, P.T.: *Predicción del impacto del cambio climático en el rendimiento de la soya (Glycine max L.) en suelo Ferralítico Rojo compactado*, Universidad Tecnológica de La Habana, CIH, Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico, La Habana, Cuba, 90 p., 2019.
- MERINO, D.: *Caracterización morfo fisiológica y agronómica de cultivares de soya [Glycine max (L.) Merr.] en siembra de invierno en suelo pardo con carbonatos*, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas Facultad de Ciencias Agropecuarias, Tesis de Diploma, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 65 p., 2006.
- MORÁN, A.J.R.; NOVILLO, C.M.J.: *Selección de los Modelos de Proyección para el Cambio Climático del CMIP6 con mejor desempeño para el territorio ecuatoriano*, Inst. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Guayaquil, Ecuador, 58 p., 2022.
- MORLA, F.; GIAYETTO, O.: “Calibración y validación del modelo AquaCrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba”, En: *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Argentina*, 2012.
- OFA Y CC: *Observatorio de Frutos Amazónicos y Cambio climático. Escenarios bajo los modelos SSP y RCP, [en línea]*, Inst. Observatorio de Frutos Amazónicos y Cambio climático, 11-19 p., 2023, Disponible en: <https://frutosamazonicos.org.bo>.
- PÉREZ, R.; ÁLVAREZ, M.: *Necesidades de Riego de la Caña de Azúcar en Cuba*, Ed. Academia, vol. 2, 219, ISBN: 959-270-065-6 p., 2005.
- PLANOS, G.E.; RIVERO, R.; GUEVARA, V.: *Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba*, Inst. Agencia de Medio Ambiente (AMA), La Habana, Cuba, 2012.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, Ed. Estudio FAO Riego y Drenaje 66, Rome, Italy, 510 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4.
- SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL: “Nuevos logros en el estudio de la pluviosidad en Cuba: Mapa Isoyético para el período 1961-2000.”, *Revista Voluntad Hidráulica*, XLIV (98): 2-11, 2006, ISSN: 0505-9461.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E.: “AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles”, *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437, ISSN: 0002-1962, 2009.
- WANI, S.; ALBRIZIO, R.; VAJJA, N.: *Sorghum*, Ed. FAO, Irrigation and drainage paper number, Steduto, P, Hsiao, TC, Fereres E, Raes Crop yield response to water ed., vol. 66, Rome, Italy, 144–151 p., 2012.

Felicita González-Robaina, Dra.C., Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353.

Enrique Cisneros-Zayas, Dr.C., Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353<sup>a</sup>. e-mail: [enrique.cisneros@iagric.minag.gob.cu](mailto:enrique.cisneros@iagric.minag.gob.cu), [cisneroszayasenrique@gmail.com](mailto:cisneroszayasenrique@gmail.com).

Carmen Duarte-Díaz, Dra.C., Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353a. e-mail: [carmen.duarte@iagric.minag.gob.cu](mailto:carmen.duarte@iagric.minag.gob.cu).

Yoima Chaterlán-Durruthy, Dra.C., Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353. e-mail: [yoima.chaterlan@iagric.minag.gob.cu](mailto:yoima.chaterlan@iagric.minag.gob.cu).

Julian Herrera-Puebla, Dr.C.; Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353. e-mail: [julia.herrera@iagric.minag.gob.cu](mailto:julia.herrera@iagric.minag.gob.cu).

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