

CAMBIO CLIMÁTICO

ARTÍCULO ORIGINAL



<http://opn.to/a/Iu2VC>

Impacto del cambio climático en el rendimiento del maíz sembrado en suelo Ferralítico Rojo compactado

Climatic Change Impact in the yield of corn planted in Compacted Red Ferralitic Soil

Ing. Yanira Castillo Iglesias¹, Dr.C. Felicitá González Robaina¹, Ing. Guillermo Hervis Granda¹, Ing. Luis Hirán Rivero¹, Dr.C. Enrique Cisneros Zayas¹

¹ Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE, Facultad de Ingeniería Civil, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Marianao, La Habana, Cuba.

¹ Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. En la investigación y planificación agrícola el desarrollo de modelos de simulación se ha convertido en una práctica común que permite orientar la investigación o el manejo hacia los puntos más críticos. *AquaCrop* es un modelo de simulación diseñado por la FAO para el análisis de la productividad en respuesta al agua disponible; donde se realiza un balance de agua en el suelo y evalúa, entre otros, el impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue predecir fechas óptimas de siembra y los rendimientos de maíz en suelo Ferralítico Rojo compactado ante escenarios de cambio climático con la utilización del modelo *AquaCrop*. En los años seleccionados del escenario A2 fue necesario aplicar 10 riegos, superando en más de 150 mm la norma total a aplicar para lograr rendimientos por encima de las 8 t ha⁻¹. Si se aplica riego deficitario las reducciones con respecto al potencial serán como promedio del 26%, y la productividad del agua en 2,40 kg m⁻³. Si se eliminan los riegos en la floración los rendimientos pueden decrecer hasta las 2,2 t ha⁻¹. Para el año medio la fecha óptima de siembra se presenta a partir de la segunda quincena del mes de diciembre. Mientras que para el año húmedo se estiman rendimientos de hasta 10 t ha⁻¹ si se siembra entre el 20 de noviembre y el 5 de diciembre. 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.

Palabras clave: modelo de simulación, escenarios climáticos, fecha de siembra, productividad del agua, riego.

ABSTRACT. In agricultural research and planning the development of simulation models has become a common practice that allows research or management to be directed towards the most critical points. *AquaCrop* is a simulation model designed by FAO for productivity analysis in response to available water; performs a balance of water in the soil and assesses, among others, the impact of climate change on crop yields. The objective of this work was to predict optimal sowing dates and corn yields in compacted Red Ferralitic soil, in the face of climate change scenarios with the use of *AquaCrop*. In the selected years of scenario A2 it was necessary to apply 10 irrigations, exceeding the total standard to be applied by more than 150 mm to achieve yields above 8 t ha⁻¹. If deficit irrigation is applied, the reductions with respect to the potential will be an average of 26%, and the productivity of water at 2,40 kg m⁻³. If irrigation risks are eliminated, yields may decrease to 2,2 t ha⁻¹. For the average year the optimum planting date is presented in the middle of December. While for the wet year yields of up to 10 t ha⁻¹ are estimated if sown between November 20 and December 5th. The results show the model as a viable alternative to select optimal planting dates, reproduce the phenology and productivity of the crop under different management scenarios and climatic variability.

Keywords: Simulation model, climate scenarios, showing day, water productivity, irrigation.

*Autora para correspondencia: Yanira Castillo Iglesias, e-mail: yaniracastilloiglesias@gmail.com

Recibido: 17/09/2019.

Aprobado:

INTRODUCCIÓN

No hay duda de que el clima juega un papel importante en la formación de la faz de la tierra y en el tipo de actividades económicas que el hombre puede practicar (Mohammed *et al.*, 2018). Se espera que el cambio climático (CC) resultante del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera altere los regímenes de temperatura y precipitación en todo el mundo, y que estos cambios, acompañados por un aumento de las fluctuaciones, causarán una gran disminución en el uso del agua de los cultivos y la producción de alimentos.

En particular, en el campo de la agricultura, Cuba enfrenta una serie de importantes desafíos, que deben ser afrontados apropiadamente. Desde hace algunos años se vienen presentando en el país cambios climáticos, reflejo de fenómenos globales y de las particularidades de la geografía cubana, los cuales han tenido repercusiones sobre la producción de algunos cultivos agrícolas. Es entonces muy importante que se implementen estrategias y se usen herramientas que faciliten la adaptación de la agricultura a los cambios que está experimentando y seguirá experimentando el clima en el futuro.

En la investigación y planificación agrícola el desarrollo de modelos de simulación se ha convertido en una práctica común que permite orientar la investigación o el manejo hacia los puntos más críticos (Gormley y Sinclair, 2003).

La mayoría de los estudios han asociado la variabilidad climática al resultado, como el rendimiento, los valores y los beneficios económicos de las explotaciones (OMM, 2009). Los estudios climáticos se han centrado en los rendimientos y se han enfatizado en la influencia del clima en el proceso fisiológico dinámico de crecimiento vegetal e información de grano.

Los estudios también exploraron el uso de modelos teóricos para simular los rendimientos dados los aportes climáticos diarios, las aplicaciones de nutrientes, las condiciones iniciales del suelo y las prácticas de manejo (Yang y Tsou, 2006). Los escenarios climáticos también se han utilizado en la mayoría de los estudios para evaluar el efecto del cambio climático en varios cultivos. Al incorporar estos escenarios en los modelos de cultivos en algunos casos, los rendimientos simulados se comparan con los rendimientos observados con un éxito notable. Por este motivo, los estudios de variabilidad y cambio climático se han convertido en el punto focal de la diversificación de cultivos en todo el mundo (Müller *et al.*, 2011).

La importancia del agua en la producción de alimentos obliga a utilizarla con mayor eficiencia. Las proyecciones muestran que para alimentar una población mundial de 9 100 millones de personas en 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70% entre 2005/07 y 2050. Ello implica un aumento importante en la producción de varios productos básicos fundamentales FAO (2009), como es el caso de los granos.

En la agricultura de regadío, la práctica de riego es uno de los procesos más complejos que debe realizar el agricultor debido a la multitud de factores implicados en el manejo del agua, requiriéndose de información técnica para el conocimiento preciso entre el agua usada y el rendimiento de los cultivos (García *et al.*, 2009; Domínguez *et al.*, 2012).

Pocos trabajos en Cuba han estudiado la respuesta al agua,

no se explotan todas sus potencialidades y se han publicado pocas expresiones de la función agua rendimiento para las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana; región donde predominan los suelos del agrupamiento Ferralítico (más del 70%), se cultiva gran parte de la producción de granos, viandas y hortalizas del país (33% de la producción agrícola) y es la más poblada. Por tanto, el manejo eficiente del agua en ella para obtener rendimientos agrícolas óptimos con un mínimo de afectación medioambiental, constituye una cuestión de vital importancia en la economía nacional (López *et al.*, 2009).

Uno de los cultivos priorizados para esta zona es el maíz (*Zea mays* L.), durante su producción se presentan problemas de variabilidad climática, incidencia de plagas y enfermedades, uso del agua de riego, entre otros. Debido a lo anterior es necesario que el país pueda disponer de herramientas que le sirvan de ayuda a la toma de decisiones para lograr el menor costo económico y ambiental. Según López *et al.* (2009), los modelos dinámicos de simulación resultan herramientas indispensables en las investigaciones y el manejo agrícola.

Entre los modelos existentes, *AquaCrop*, modelo de aplicación general de cultivo, se ha utilizado en varias zonas del mundo bajo diferentes condiciones ambientales. Es un modelo de desarrollo de follaje, enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción en respuesta al agua disponible (Raes *et al.*, 2009).

AquaCrop es desarrollado por la FAO, con la ventaja de ser relativamente sencillo en comparación con otros modelos de simulación de rendimientos, por lo que con sólo calibrar algunos parámetros se obtienen resultados similares a la realidad. Esto facilita el uso del modelo en tanto que la información necesaria para adaptarlo a las condiciones de nuestro país no es tan grande en comparación a otros modelos y la plataforma del software resulta ser de fácil manejo.

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; comparar los resultados de varios planes de suministro hídrico; optimizar los calendarios de riego (ya sean máximos, deficitarios o complementarios), y mejorar las estrategias de gestión para aumentar la productividad y el ahorro del agua (Steduto *et al.*, 2009).

Recientemente, González *et al.* (2018) y González *et al.* (2019), calibraron y validaron el modelo *AquaCrop* para maíz, sorgo y soya, respectivamente, en suelo Ferralítico Rojo en Alquizar, Artemisa. Los resultados de la calibración del modelo permitieron optimizar los parámetros fundamentales de suelo y cultivo para su aplicación en las condiciones de estudio, destacándose la duración de las fases fenológicas, el índice de cosecha, los límites de agotamiento de la reserva de agua para definir el estrés hídrico y la curva número para la determinación del escurrimiento superficial.

El objetivo de este trabajo fue predecir fechas óptimas de siembra y los rendimientos de maíz en suelo Ferralítico Rojo compactado en la Llanura Habana-Matanzas ante escenarios de cambio climático con la utilización de *AquaCrop*.

MÉTODOS

Localización del área de estudio y caracterización climática

El modelo fue calibrado y validado para el cultivo del maíz por González *et al.* (2018), con datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (diciembre-marzo) en el período 1980-1990, bajo un sistema de riego superficial por surcos en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, 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 maíz T66 (Giralt, 1990). La fecha de siembra fue 16 de diciembre, con temperaturas umbrales de 20 a 31 °C, la madurez se alcanzó 124 días después de la siembra, la densidad de población fue 48 000 plantas ha⁻¹ y el rendimiento 5-8 t ha⁻¹.

El tipo de suelo en estudio es Ferralítico Rojo Compactado (de acuerdo a la Segunda Clasificación Genética de los Suelos en Cuba, Instituto de Suelos, 1980), de la zona sur de La Habana. Esta zona forma parte de la llanura cársica Habana-Matanzas, muy plana, con una altura inferior a 30 metros del nivel del mar.

Las propiedades físicas fundamentales para cada capa del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado han sido reportadas y actualizadas por Cid (2006) y Cid *et al.* (2011) y se resumen en la Tabla 1 y conforman el fichero de suelo que se utilizó para todas las corridas en el modelo *Aquacrop*.

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

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

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

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

Este suelo pertenece al grupo A de los suelos cubanos por clases hidrológicas (cultivo en hileras, surcos rectos y condiciones hidrológicas malas, debido a la compactación del suelo) López *et al.* (1998), por lo que se adoptó la curva número (CN) 71 para representar el escurrimiento superficial y se consideró que no existe estancamiento de agua en superficie. Para la calibración del modelo se optó por no evaluar de manera particular ninguna reducción del crecimiento asociada al nivel de fertilización, evitando la mayor complejidad que supone analizar la interacción entre la disponibilidad de agua y la nutrición de los cultivos.

Los datos climáticos fueron tomados de la estación meteorológica localizada en el área experimental. El clima se caracteriza por una media anual de precipitaciones que alcanza los 1 531 mm, de los cuales el 68% (1 044,4 mm) se distribuyen entre los meses de mayo y octubre, correspondientes al período lluvioso y el restante 32% (486,4 mm) corresponden al período seco, que se extiende desde el mes de noviembre hasta el mes de abril (Chaterlán, 2012). Durante el período seco el balance de lluvia y evapotranspiración potencial de la zona es negativo por lo que el riego es imprescindible para la obtención de buenos rendimientos agrícolas (Figura 1).

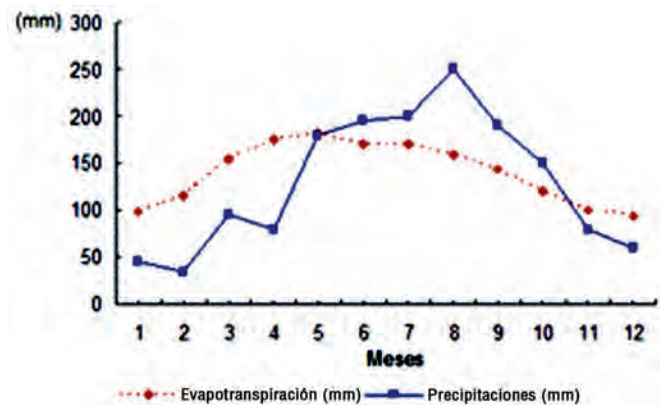


FIGURA 1. Distribución mensual del balance de precipitación y evapotranspiración para el período 1980-2010.

Otros factores como la temperatura y sus variaciones no ejercen mayor influencia en la caracterización climática de la zona en estudio ya que éstas no presentan grandes diferencias durante el año. Mientras que la curva de la evapotranspiración potencial (ET) mantiene una tendencia similar a la evaporación, en los meses secos es relativamente baja, pero aumenta rápidamente en el inicio de la época de lluvia. El promedio anual de ET es de 1682,7 mm y los máximos y mínimos corresponden a los meses de abril y mayo (175,2 y 181,0 mm) y diciembre y enero (93,9 y 98,0 mm), respectivamente.

Para la obtención de estos datos se hizo uso de los valores climáticos del modelo regional PRECIS, este modelo, desarrollado por el Centro Hadley del Reino Unido, presenta una resolución

de 25 x 25 km², que según Planos *et al.* (2013), ha permitido representar el clima futuro en pequeños países. Del PRECIS se tomaron las variables: temperatura máxima y mínima, humedad

relativa, velocidad del viento y precipitación del modelo regional Ecam para el escenario A2 de la cuadrícula que se muestra en la Figura 2, que representa el clima futuro para el área de estudio.

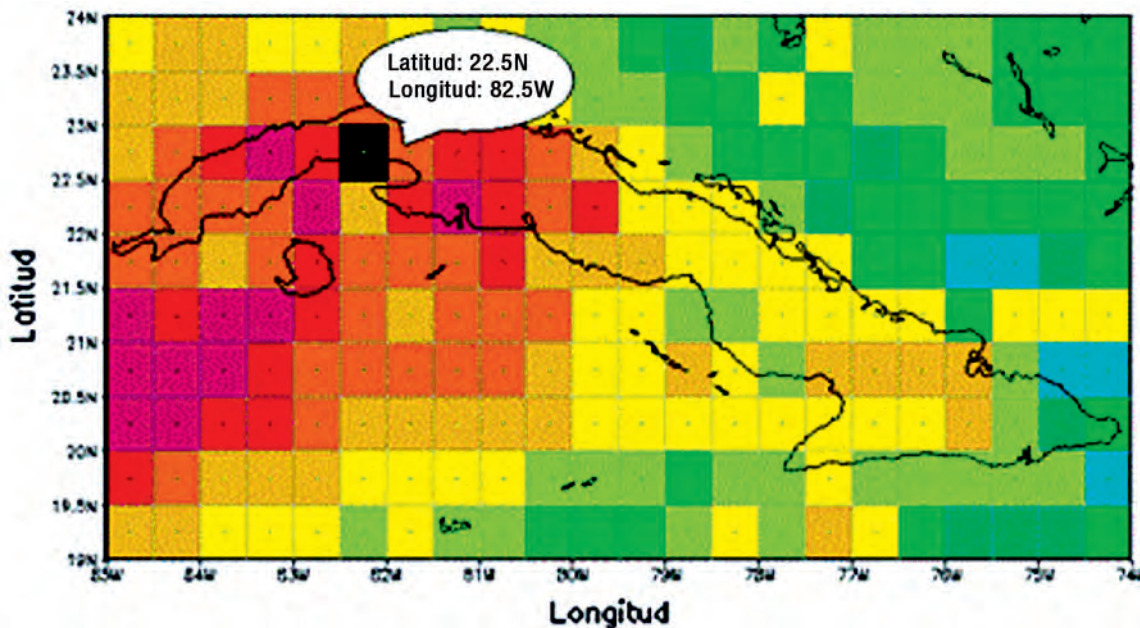


FIGURA 2. Cuadrícula del modelo PRECIS que contiene la información de las variables climáticas para el escenario evaluado en el área de estudio.

El escenario A2 de acuerdo a los criterios de Planos *et al.* (2012), obtenidos para Cuba; caracterizados por considerar una economía orientada a las regiones, donde el crecimiento económico y el desarrollo tecnológico son más lentos respecto a otras líneas evolutivas.

Procesamiento de las precipitaciones

La metodología para el procesamiento de los datos de lluvia, indispensable en la programación del suministro de agua y el manejo de la misma, fue tomada de Steduto *et al.* (2012) y es apoyada por las indicaciones de la norma cubana (NC 48-35, 1984). Las precipitaciones para el período 2019-2050 para el escenario A2, se procesaron y se evaluaron para definir las características de los períodos climáticos según la probabilidad de ocurrencia en el período (húmedo, medio y seco) sobre 25, 50 y 75 %. Como el cultivo analizado se desarrolla en el período de noviembre-abril, el análisis se centró en este período.

La evapotranspiración de referencia fue estimada en el programa CROPWAT (versión 8.0) a partir de datos de temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa y la velocidad del viento, disponibles en cada escenario y período climático analizado. En el software se usa la metodología propuesta por Allen *et al.* (1998), cuando existen limitaciones de datos para la aplicación del método, esta utiliza la radiación global de onda corta a partir de la diferencia de la temperatura máxima y mínima ($T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}$) y valores medios de velocidad del viento a una altura de 2 metros, para esto se debe introducir la ubicación espacial de las estaciones meteorológicas (coordenadas Norte y Oeste) y altitud sobre el nivel medio del mar.

La precipitación efectiva fue estimada a partir del módulo de precipitación, considerando los datos diarios de lluvia ex-

traídos de PRECIS para los escenarios y períodos climáticos, el método empleado fue el USDA (Soil Conservation Service), debido a que este es el más recomendado por la FAO y ha sido validado para las condiciones del área de estudio por Elizastigue (2018).

Modelo AquaCrop

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

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

Variable	Ecuación	Descripción
Biomasa acumulada producida (kg m ⁻²)	$B = WP \sum Tr$	WP es el parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m ³ de agua transpirada) Tr es la transpiración del cultivo (ya sea mm o m ³ por unidad de superficie) con la suma respecto al tiempo en el que se produce la biomasa B es la biomasa del cultivo
Rendimiento del cultivo	$Y = B * Hi$	Hi índice de cosecha dependiendo del tipo y variedad del cultivo.

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

Conservando el concepto original de un vínculo directo entre el uso del agua en el cultivo y su rendimiento, el modelo *AquaCrop* evolucionó a partir del enfoque del Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 33, al separar la evaporación del suelo no productiva (E) de la transpiración del cultivo productiva (Tr) y al estimar la producción de biomasa directamente a partir de la transpiración del cultivo real mediante un parámetro de productividad del agua.

En la mayoría de los cultivos, solo una parte de la biomasa producida se destina a los órganos cosechables para producir

rendimiento (Y), y la relación entre el rendimiento y la biomasa se conoce como índice de cosecha (Hi), por tanto, los procesos subyacentes que culminan en B y Hi se diferencian claramente entre sí. En consecuencia, la separación de Y en B y Hi permite considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en B y Hi por separado.

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

Se debe especificar el contenido de agua de las capas del perfil del suelo al comienzo del período de simulación, a menos que esté en capacidad de campo. Se consideró un contenido de agua en el suelo de 0,37 cm³ cm⁻³, que representa el 90% del contenido de agua en el suelo a capacidad de campo 0,39 cm³ cm⁻³ hasta una profundidad de 0,40 m.

En la Tabla 3 se resumen los parámetros más importantes que resultaron de la calibración y validación de este modelo para el maíz en suelo Ferralítico Rojo compactado por González *et al.* (2018), y que servirán de entrada a todas las simulaciones que se realizarán en este estudio.

TABLA 3. Parámetros de entrada para maíz en suelo Ferralítico Rojo compactado, Artemisa, Cuba

Parámetro	Valor usado
Densidad de plantación (plantas ha ⁻¹)	48000
Cobertura inicial del dosel	0,31
Expansión del dosel (% día ⁻¹)	14,6
Declive del dosel (% día ⁻¹)	8,7
Emergencia (días después de plantación)	7 días
Máxima cobertura del dosel (días después de plantación)	64 días
Inicio de la senescencia (días después de plantación)	106 días
Longitud de florescencia (días después de plantación)	54 días
Duración de florescencia (días)	20 días
Madurez (días después de plantación)	124 días
Máxima profundidad efectiva radicular (m)	0,40 m
Máxima profundidad radicular (días después de plantación)	64 días
Máxima evapotranspiración del cultivo	1,2
Productividad del agua normalizada (g m ⁻²)	32
Índice de cosecha (HI) (%)	40
Curva número	71
Capa impermeable de suelo (m)	0,4

La cobertura del dosel vegetal al 90% de emergencia y el máximo crecimiento fueron 0,31 y 80%, respectivamente, y el coeficiente de decline del dosel por día fue estimado como 8,7%, valores que difieren de los originales calibrados en el modelo para maíz. Se presentan también los parámetros relacionados con la duración de las diferentes etapas de desarrollo del cultivo: la cantidad de días después de plantado el maíz para lograr la máxima cobertura, el comienzo de la floración y la senescencia

64, 54 y 106 días, respectivamente. El índice de cosecha (HI) considerado fue de 0,40, por ser el valor más común obtenido bajo condiciones óptimas de desarrollo durante la calibración del modelo. Este valor se encuentra en el rango (0,3 a 0,5) que propone Wani *et al.* (2012).

El modelo tiene predeterminado el valor de la productividad del agua normalizada para maíz de 32 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2012). Los ajustes de *AquaCrop* normalizan la pro-

ductividad del agua según la concentración de CO₂ atmosférico, año tras año, en el caso particular de este trabajo este valor fue de 29,7 g m⁻², inferior al considerado por Hsiao *et al.* (2009), y aspecto a tener en cuenta en otras simulaciones con este modelo.

Aplicaciones

Se simuló la producción ajustada para el escenario A2 del IPCC en los tres años seleccionados del período 2019-2050 (húmedo, medio y seco). El escenario A2 contempla un patrón de emisiones mayores que el escenario B2 por lo que los efectos del cambio climático resultan ser más pronunciados.

Los resultados que se van a presentar corresponden a las salidas del modelo *AquaCrop* una vez se han incorporado los cambios en el clima que se prevén de acuerdo a los escenarios de cambio climático contemplados, por lo que deben considerarse tan solo como indicativos y no como proyecciones precisas de lo que va a suceder en el futuro. No debe olvidarse la alta incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas futuras.

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 de cada escenario climático seleccionado. La programación del riego se hizo de manera automática al llegar al 50% de la humedad disponible en el suelo por el modelo *Cropwat*. También se simuló riego deficitario con el objetivo de estimar los rendimientos futuros.

Como parte de los resultados se realizó una estimación de la fecha más apropiada para la siembra de maíz en la zona de estudio para año lluvioso y medio del escenario A2, con el fin de evaluar el efecto del cambio climático.

El indicador de estrés es el agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular (Dr), expresados como fracciones (p) del agua disponible total en el suelo (Rosadi *et al.*, 2007). El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico:

- 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal.
- 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal.
- 3) cierre estomático.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Caracterización del clima futuro para el escenario climático A2 en el período 2020 – 2050 (mediano plazo)

En la Figura 3 se presenta el comportamiento de la precipitación media mensual para el período base (1971-2000) y del período futuro a mediano plazo (2020-2050) bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2. Puede observarse que el comportamiento medio en este período es al aumento de las precipitaciones en los meses de abril-junio, septiembre y octubre; en resto de los meses la tendencia es a la disminución. Las disminuciones en las precipitaciones medias mensuales para el período analizado pueden ser observadas en forma de anomalía porcentual (diferencia porcentual entre el período futuro respecto al base) en la Figura 4.

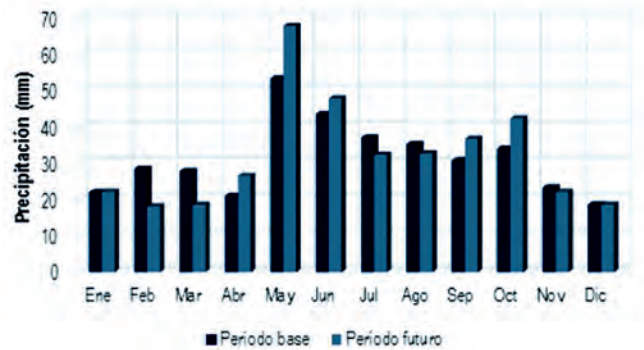


FIGURA 3. Precipitación media mensual para el período base y período futuro (mediano plazo), considerando el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2.

Nótese que, para los meses de febrero y marzo, para las condiciones del escenario A2 el modelo *Echam* proyecta una disminución de la precipitación alrededor de -36 y -33% respectivamente respecto al período base, mientras que, en los meses de julio y agosto las reducciones se proyectan entre -12 y -7%, respectivamente. Por otra parte, en los meses de abril y mayo (transición del período seco al período húmedo) se pronostican un aumento de las precipitaciones respecto al clima base superior a 20%.

Los resultados generados por el modelo *Echam A2* para la región de estudio, en sentido general, proyectan un aumento de 20% de las precipitaciones en el período húmedo y un descenso de 18% en el período seco, lo que confirma la tendencia del período seco a una mayor aridez, sin embargo, el balance de precipitación anual muestra una clara tendencia a aumentar. Al menos en este período y escenario el modelo no proyecta variación de la distribución estacional de las precipitaciones para esta región, discrepando con lo expuesto en el informe del *Panel Intergubernamental de Cambio Climático* sobre las posibles consecuencias del CC en las precipitaciones (Camino *et al.*, 2014).

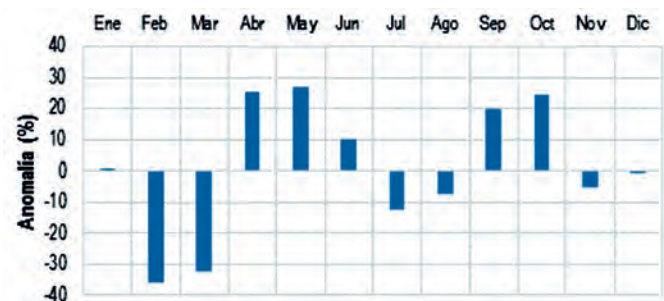


FIGURA 4. Anomalías en la precipitación mensual para el escenario SRES A2.

Sin embargo, las anomalías proyectadas si coinciden con las expuestas por Bates *et al.* (2008) para las pequeñas islas del Caribe para el escenario A2, donde se establece un rango de afectación entre -36.3 a +34.2 para el mediano plazo. Sobre la información de la *Organización Mundial de Meteorología OMM* (2009), explica que las proyecciones de impacto del clima futuro en esta variable pueden variar de una región a otra, estimándose que, en algunas zonas, habrá aumento en las lluvias y otras sufrirán por la escasez de ellas.

Similares resultados en el área de estudio fueron obtenidos por Verdecia (2016) y Quintana (2018), aunque en el caso del último trabajo el escenario evaluado es el A1B que difiere del evaluado en esta investigación, sin embargo, pertenecen a la misma familia genética.

En la Figura 5 se presenta la gráfica comparativa de la temperatura máxima y mínima en el período base y las proyecciones del modelo Echam para estas variables en el período 2020-2050. Puede observarse que los resultados del modelo indican el aumento de las temperaturas respecto a las temperaturas en el clima base. Las proyecciones indican que la temperatura máxima aumentara en 1°C, mientras que la temperatura mínima aumentara 1,15°C.

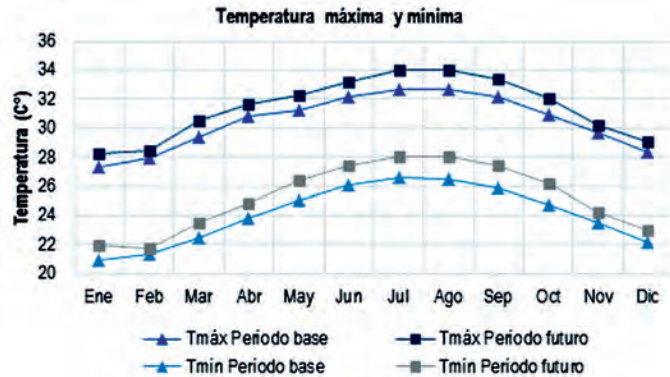


FIGURA 5. Gráfica comparativa de temperaturas máximas y mínimas.

Las anomalías en la temperatura proyectada para la región de estudio refuerzan la necesidad de establecer medidas de adaptación en el sector agrícola en la zona, pues según plantea

el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC (2007), si la temperatura se incrementa a los niveles de finales del siglo XX, se prevén impactos negativos sobre la producción de los principales cultivos (trigo, arroz y maíz).

En el escenario A2 a partir de los datos diarios de precipitación media ponderada en el período de 2020 a 2050, de coordenadas Latitud 22° 5'N, Longitud 82° 5'W y con una altitud de 11,3m, fueron seleccionados los periodos secos de cada año que coincidían a su vez, con el periodo de siembra del cultivo (Noviembre-Abril). Dichos datos de precipitación fueron sumados para obtener la lluvia acumulada total en cada uno de estos periodos e introducidos posteriormente en el programa WINSKOL, calculando así la distribución de mejor ajuste para una probabilidad de un 25, 50 y 75% con el objetivo de obtener los períodos húmedo, medio y seco, respectivamente. A partir de los resultados de este programa, se selecciona el año semejante para cada una de estas probabilidades, resultando el período húmedo 2021-2022, período medio 2044-2045 y período seco 2019-2020.

En la Figura 6 a) se presenta el comportamiento de las variables de temperatura, precipitación y ETo, para el escenario A2 en el período húmedo (2021-2022), en este caso el comportamiento de la temperatura varía desde los 20°C en el mes de enero hasta los 32°C en el mes de abril. El acumulado de la lluvia para este período es de 158,5 mm, produciéndose el valor más bajo del acumulado en el mes de febrero (8,5 mm) coincidiendo con la fase de desarrollo del cultivo. En el caso de la evapotranspiración de referencia se encuentra en un rango 52,7 mm en el mes de diciembre hasta 101,4 mm en el mes de abril.

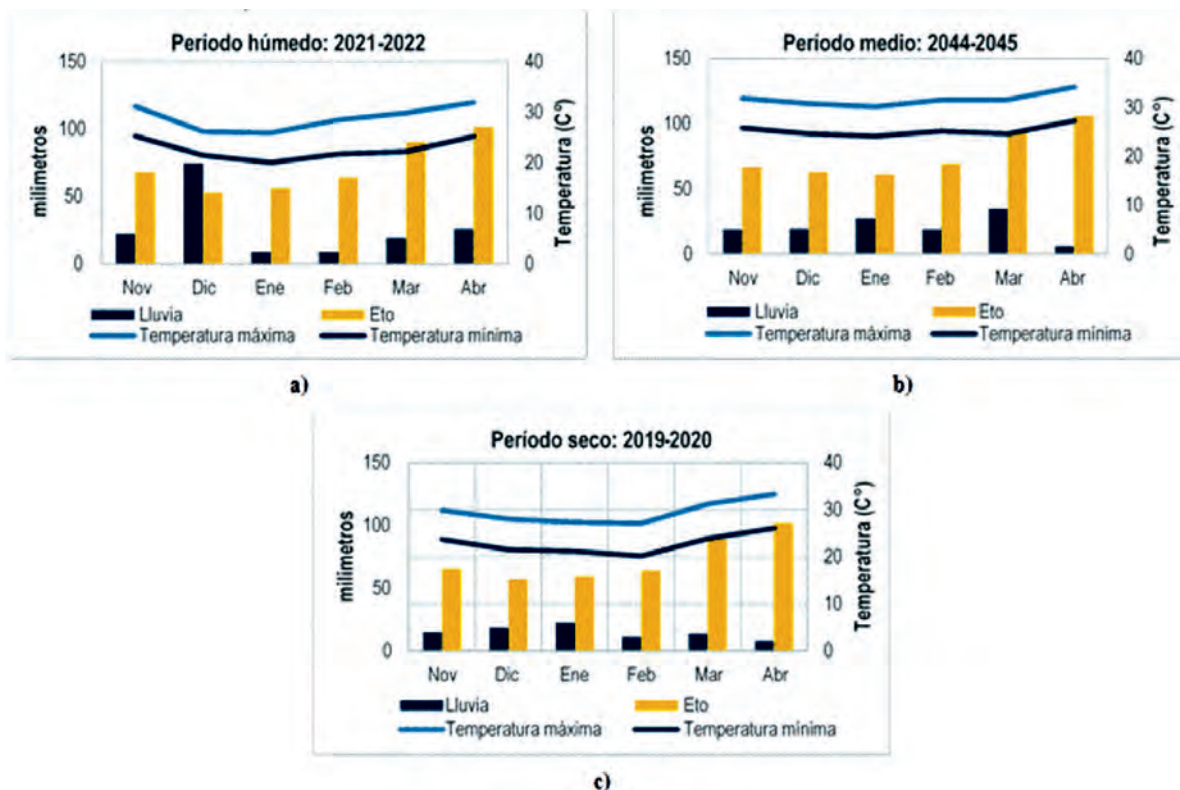


FIGURA 6. Comportamiento de las variables climatológicas en el escenario A2 para los períodos húmedo (a), medio (b) y seco (c).

Por otra parte, en la Figura 6 b) puede observarse que para el período medio (2044-2045), la temperatura varía desde los 24,1°C en el mes de enero hasta los 34,2°C en el mes de abril, observándose de manera general un aumento de las temperaturas, así como la influencia de esta variable sobre la disminución de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración con respecto al período húmedo. El acumulado de la lluvia para este período es de 125,1 mm, reduciéndose la lluvia en un 21% respecto al período húmedo, la precipitación más baja de este período se produce en el mes de abril, con un valor de 6.1 mm coincidiendo con la fase final del cultivo. En el caso de la evapotranspiración de referencia se encuentra en un rango 60,8 mm en el mes de diciembre hasta 101,4 mm en el mes de abril, evidenciándose un aumento de un 14% (8,1 mm) para el mes de abril a causa del aumento de la temperatura respecto al período anterior.

En el período seco (2019-2020) (véase la Figura 6 c) la temperatura varía desde los 20°C en el mes de febrero hasta los 33,3°C en el mes de abril. El acumulado de la lluvia para este período es de 88,2 mm, siendo un 56% de la lluvia acumulada del período húmedo, la precipitación más baja de este período se produce en el mes de abril al igual que en período medio, con un valor de 7,7 mm coincidiendo con la fase final del cultivo. En el caso de la evapotranspiración de referencia se encuentra en un rango 57 mm en el mes de diciembre hasta 101,7 mm en el mes de abril, siendo a la vez el valor más alto de los tres períodos analizados.

Los resultados obtenidos coinciden con lo explicado por McNulty *et al.* (1997) y Goyal (2004), que refieren que, en las predicciones de los modelos de cambio climático, se espera que la ETo aumente en los próximos años debido a un aumento de la temperatura previsto. Además, en cuento a los cambios en la ETo apoyan lo expresado por Moratiel *et al.* 2011 y Pereira (2011), sobre su aumento debido al CC, especialmente en invierno y primavera cuando el aumento de la temperatura podría ser mayor.

En la Tabla 4 se compara la producción potencial de maíz para el año 1998-1999 con las simuladas para los tres años del escenario A2, según la probabilidad de ocurrencia en el período (húmedo, medio y seco) sobre 25, 50 y 75 %.

TABLA 4. Comparación de las salidas del modelo para la simulación del rendimiento potencial de maíz en diferentes años

Variable	Escenario A2			
	1998-1999	Año húmedo (2021-2022)	Año medio (2044-2045)	Año seco (2019-2020)
Biomasa (t ha ⁻¹)	20,5	21,7	23,1	22,4
Rendimiento (t ha ⁻¹)	8,21	8,4	8,79	8,5
WP _{ET} (kg m ⁻³)	2,35	3,18	3,04	3,26
Lluvia (mm)	522	158,5	125,1	88,2
Riego (mm)	35	188	190	189
No. riegos	2	10	10	10
Evaporación Total (mm)	124	93,1	109	91,3
Transpiración Total (mm)	292,9	172,4	186,3	171,1
Evapotranspiración Total (mm)	349,3	298,5	320	299

En el año 1998-1999 solo fue necesario aplicar 2 riegos (35 mm) para garantizar la germinación. En el resto del ciclo las necesidades hídricas del cultivo fueron suplidas por las precipitaciones, que alcanzaron valores de 522 mm en este período.

En los tres años seleccionados del escenario A2 fue necesario aplicar 10 riegos, superando en más de 150 mm la norma total a aplicar para lograr rendimientos superiores a las 8 t ha⁻¹. Los valores diarios de transpiración no superan los 4 mm día⁻¹, lo que corrobora lo planteado en el epígrafe anterior de caracterización climática sobre el aumento de las temperaturas para estos años, así como la influencia de esta variable sobre la disminución de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración.

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 CO₂. 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.

Resultados similares fueron publicados por Alarcón (2015), en un estudio sobre el efecto del cambio climático en el rendimiento del maíz en Perú, donde se concluye que para evitar el estrés hídrico se necesitaría adicionar una lámina de riego en el rango de 1200-1500 m³ ha⁻¹, distribuidas principalmente durante la etapa de floración.

En la Figura 7 se presenta la salida del modelo *AquaCrop* para el rendimiento potencial del maíz en suelo Ferralítico Rojo compactado en el período 1998-1999 y para un año medio del escenario A2 (2044-2045). Se puede apreciar que el suelo, a pesar de las abundantes lluvias en 1998-1999, no estuvo a capacidad de campo en todo el ciclo de cultivo, presentando exceso hídrico en algunos períodos, lo que ocasionó un cierre de estomas para un índice de estrés del 39% al final del ciclo, que conllevó a una disminución de la transpiración de la planta, sin ocasionar reducción en el rendimiento (Figura 7A).

Entre los 20 y 40 días después de sembrado, el maíz presentó índice de estrés de un 10% en la expansión del crecimiento foliar y 15% en el cierre de estomas, no afectando el rendimiento final por el aporte significativo de las precipitaciones. Similar situación se presenta para el año medio del escenario A2 (2044-2045), solo que con una marcada disminución en más de 400 mm de las precipitaciones y estrés hídrico en todo el período.

Los valores de rendimiento y productividad del agua están en el intervalo publicado en trabajos precedentes de González (2013) y González *et al.* (2015). En el caso particular del rendimiento en experimentos de campo varió entre 3,9 y 8,3 t ha⁻¹ y la productividad en base al rendimiento alcanzó valores de 2 y 3 kg m⁻³.

El modelo *Aquacrop* fue validado por Morla y Giayetto (2012) para maíz en la región de Río Cuarto, en el centro-sur de Córdoba, Argentina. Rendimientos de 4,5; 8 y 11,8 t ha⁻¹ fueron simulados para año seco, medio y húmedo, respectivamente. Considerando estos valores potenciales de producción como referentes de la capacidad productiva de los ambientes de esta región.

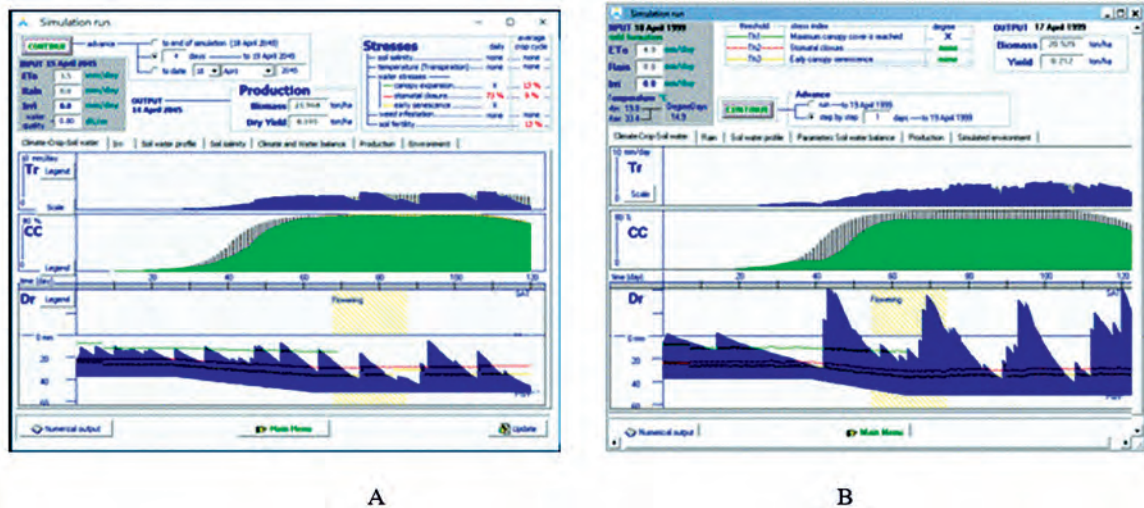


FIGURA 7. Salida del modelo para rendimiento potencial del maíz: A:(1998-1999) y B: (2044-2045).

De acuerdo con esto, los valores de rendimiento simulados ponen de manifiesto que cada cultivo 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.

Riego deficitario

Si se aplica riego deficitario (eliminando 2 riegos antes de la floración, se reduce a 149 mm) en el año húmedo y bajo el escenario A2, los rendimientos se estiman en 5,56 t ha⁻¹ y la biomasa 15 t ha⁻¹, lográndose una productividad de 2,40 kg m⁻³, con reducciones con respecto al potencial hasta de un 26%. 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 los 60 días se alcanza un estrés del 100% inhibición de la expansión del dosel vegetal y 39% cierre estomático.

Mientras que si se reducen los riegos a 6 (98 mm, se eliminan dos riegos en la floración) los rendimientos decrecen hasta las 2,2 t ha⁻¹ y se observa a los 65 días estrés del 100% inhibición de la expansión del dosel vegetal y 33% cierre estomático. A los 90 días la ausencia de precipitaciones ocasiona un 100% en la aceleración de la senescencia del dosel vegetal como respuesta al estrés hídrico.

Varios autores no recomiendan estrés hídricos durante la floración y llenado del grano Lamm *et al.* (1994); Otegui *et al.* (1995); Steduto *et al.* (2012), debido a que provoca directamente la reducción de la tasa de producción de biomasa, y por tanto muy bajos rendimientos.

Fecha óptima de siembra

Para tratar de establecer un rango de fechas óptimas de acuerdo a los supuestos, se utilizó el modelo para que simulara el desarrollo del cultivo y predecir su rendimiento. Para ello se utilizó un escenario lluvioso y uno medio. En la Figura 8 se

muestran los rendimientos que se obtendrían modificando la fecha de siembra diariamente en 62 corridas del modelo.

Los rendimientos mostrados, involucran la respuesta fisiológica del cultivo a la cantidad de precipitación por fase fenológica. Puede observarse que para el año medio se presenta un máximo de rendimiento a mediados del mes de diciembre, específicamente del 15 al 30. Bajo las condiciones de este estudio (condiciones climatológicas de un año categorizado como medio), sembrando en este período, en promedio se obtendrían rendimientos cercanos a las 8 t ha⁻¹. Otro período de importancia se observa entre el 4 y 16 de noviembre, donde se pueden alcanzar rendimientos por encima de 7 t ha⁻¹, y específicamente el 8 de noviembre este valor alcanza el máximo. Mientras que para el año húmedo seleccionado se estiman rendimientos de hasta 10 t ha⁻¹ si se siembra entre el 20 de noviembre y el 5 de diciembre; fechas de siembra en las que los rendimientos para el año medio decrecen en un 50% con relación al húmedo.

Si se comparan los rendimientos para los tres años del escenario A2, el 16 de diciembre es la fecha de siembra donde el modelo estima los mejores rendimientos, sin embargo, las diferencias con el 8 de noviembre son inferiores al 10%. Estos resultados permiten proponer a esta fecha como una alternativa a considerar. En el año seco en las dos fechas que se proponen como óptimas los rendimientos no logran superar las 6 t ha⁻¹.

Resultados que coinciden con los estudios de Morla y Giayetto (2012) y Denka (2014) que concluyen en sus estudios que la siembra en la fecha adecuada garantiza que el entorno agroclimático sea favorable para un crecimiento y desarrollo óptimos y, por lo tanto, rendimientos superiores, aumentando la productividad y mejoras en los ingresos de los productores. La aplicación del presente estudio, también constituye un aporte técnico ya que ayuda a comprender mejor la climatología de la zona de estudio y su variabilidad en los años. Establece con claridad que el seleccionar una fecha de siembra determinada debe obedecer a diferentes variables, entre estas, la variable climática. Este trabajo deja claro que se deben utilizar diferentes fechas de siembra según la distribución mensual de la lluvia, para lo cual se requiere de un análisis anual que permita la

clasificación del año bajo escenarios específicos, y que por lo tanto, el uso de fechas de siembra tradicionales sin considerar

la variabilidad climática regional, es un procedimiento de alto riesgo y sin lugar a dudas, inapropiado.

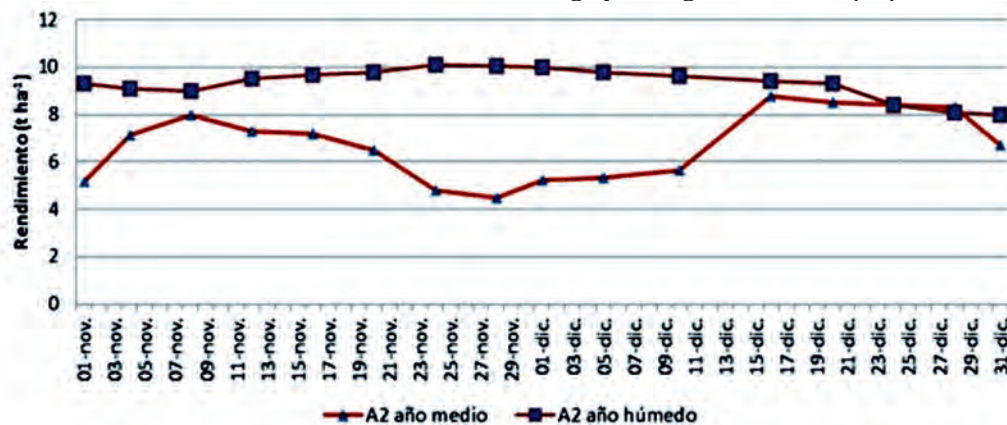


FIGURA 8. Rendimiento del maíz bajo un escenario A2 para año húmedo y medio con base en diferentes fechas de siembra.

CONCLUSIONES

- Los resultados muestran al modelo como una alternativa viable para reproducir la fenología y productividad del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y variabilidad climática.
- La tendencia de las precipitaciones en el escenario A2 se caracteriza por el aumento en los meses de abril-junio, septiembre y octubre; en el resto de los meses a la disminución.
- En los tres años seleccionados del escenario A2 fue necesario aplicar 10 riegos, superando en más de 150 mm la norma total a aplicar para lograr rendimientos superiores a las 8 t ha⁻¹.
- Si se aplica riego deficitario las reducciones con respecto al potencial serán como promedio del 26%, los rendimientos se estiman en 5,56 t ha⁻¹ y la productividad de 2,40 kg m⁻³. Si se eliminan los riegos en la floración los rendimientos pueden decrecer hasta las 2,2 t ha⁻¹.
- Para el año medio se presenta un máximo de rendimiento a partir de segunda quincena del mes de diciembre. Otro período de importancia se observa entre el 4 y 16 de noviembre, donde se pueden alcanzar rendimientos por encima de 7 t ha⁻¹. Mientras que para el año húmedo se estiman rendimientos de hasta 10 t ha⁻¹ si se siembra entre el 20 de noviembre y

el 5 de diciembre.

- La habilidad del modelo *Aquacrop* para describir el efecto del estrés hídrico ocurrido en momentos particulares del ciclo de los cultivos, hacen que se posicione como una herramienta de gran utilidad para su uso en la determinación de prácticas de manejo como puede ser la elección de fechas de siembra óptimas, y en el desarrollo de estrategias de riego.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados del Proyecto 2: “Fortalecimiento de Capacidades para la Coordinación de Información y los Sistemas de Monitoreo/MST en Áreas con Problemas de Manejo de los Recursos Hídricos”, del Programa de Asociación de Países (CPP/OP 15, Country Pilot Partnership) sobre Manejo Sostenible de Tierras PIMS (3005) en Apoyo al Programa Nacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía en Cuba, como donante el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), Implementadores: ONU Ambiente y PNUD, Ejecutor: Agencia de Medio Ambiente, Agencia Técnica de Colaboración FAO y con la participación de diversas instituciones nacionales. Muchas gracias por el valioso apoyo a la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALARCÓN, A.L.D.: Efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz amarillo duro bajo condiciones de La Molina utilizando el modelo Aquacrop, Universidad Agraria La Molina, Eng. Thesis, Lima, Perú, 105 p., 2015.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M.: “Evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements”, FAO Irrigation and drainage paper, 56: 300, 1998, ISSN: 0254-5293.
- CAMINO, R.E.; RUGGERONI, P.J.; HERNÁNDEZ, H.F.: “Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas”, Revista Tiempo y Clima, 5(43), 2014, ISSN: 2340-6631.
- CHATERLAN, D.Y.: Precisión en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. Caso de estudio: cultivos de ajo y cebolla en las condiciones edafoclimáticas del sur de Artemisa, Inst. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana, Cuba, 156 p., 2012.
- CID, L.G.: “Parámetros fundamentales para la caracterización hidropedológica general de los suelos”, Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 15(4): 42–47, 2006, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- CID, L.G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, P.M.E.: “Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos

- Revista Ingeniería Agrícola, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 10, No. 1 (enero-febrero-marzo, pp. 49-60), 2020 de simulación”, Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 20(2): 42-46, 2011, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ, R.; DE JUAN, J.; MARTÍNEZ, R.A.; TARJUELO, J.: “Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment”, *Agricultural Water Management*, 107: 42-53, 2012, ISSN: 0378-3774.
- ELIZASTIGUE, S.Y.: Evaluación de la lluvia efectiva con diferentes métodos empíricos, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), Eng. Thesis, La Habana, Cuba, 71 p., 2018.
- FAO: La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050, Roma. Italia, 4 p., 2009.
- GARCÍA, V.M.; FERERES, E.; MATEOS, L.; ORGAR, F.; STEDUTO, P.: “Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop”, *Agronomy Journal*, 101(3): 477–487, 2009, ISSN: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- GIRALT, E.: Informe final proyecto, Inst. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), La Habana, Cuba, 56 p., 1990.
- GONZALÉZ, R.F.: Funciones agua-rendimiento para cultivos de importancia agrícola en Cuba, Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical “Alejandro de Humboldt”, PhD. Thesis, La Habana, Cuba, 140 p., 2013.
- GONZALÉZ, R.F.; CISNEROS, Z.E.; HERRERA, P.J.; LÓPEZ, T.; CID, L.G.: “Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max* L) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(1): 3-13, 2019, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- GONZÁLEZ, R.F.; DELGADO, R.; DÍAZ, Y.; HERRERA, J.; LÓPEZ, T.; CID, L.G.: “Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(1): 3-12, 2018, ISSN: 2306-1545, e-ISSN-2227-8761.
- 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.
- GORMLEY, H.L.L.; SINCLAIR, L.F.: “Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Latina”, *Agroforestaría en las Américas*, (10): 103-108, 2003.
- GOYAL, R.: “Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India)”, *Agricultural Water Management*, 69(1): 1-11, 2004, ISSN: 0378-3774.
- HSIAO, T.C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E.: “AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize”, *Agronomy Journal*, 101(3): 448-459, 2009, ISSN: 1435-0645.
- INSTITUTO DE SUELOS: Clasificación genética de los suelos de Cuba, Editorial Academia, Inst. Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, Cuba, 28 p., 1980.
- IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Inst. Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), Cambridge, United Kingdom and New York, 996 p., 2007.
- LAMM, F.; ROGERS, D.; MANGES, H.: “Irrigation scheduling with planned soil water depletion”, *Transactions of the ASAE*, 37(5): 1491-1497, 1994, ISSN: 1682-1130.
- LÓPEZ, G.; HERRERA, P.J.; CASTELLANOS, A.: “Agrupamiento de los suelos cubanos en clases hidrológicas para el cálculo del escurrimiento mediante el método de la curva número”, *Ingeniería Hidráulica*, XIX(4): 22-26, 1998.
- LÓPEZ, S.T.; HERRERA, P.J.; GONZÁLEZ, R.F.; CID, L.G.; CHATERLÁN, D.Y.: “Eficiencia de un modelo de simulación de cultivo para la predicción del rendimiento del maíz en la región del sur de La Habana”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(3): 1-6, 2009, ISSN: 1010-2760.
- MCNULTY, S.G.; VOSE, J.M.; SWANK, W.T.: “REGIONAL HYDROLOGIC RESPONSE OF LOBLOLLY PINE TO AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION CHANGES I”, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 33(5): 1011-1022, 1997, ISSN: 1093-474X.
- MOHMMED, A.; LI, J.; ELARU, J.; ELBASHIER, M.M.A.; KEESSTRA, S.; ARTEMI, C.; MARTIN, K.; REUBEN, M.; TEFFERA, Z.: “Assessing drought vulnerability and adaptation among farmers in Gadaref region, Eastern Sudan”, *Land use policy*, 70: 402-413, 2018, ISSN: 0264-8377.
- MORATIEL, R.; SNYDER, R.L.; DURAN, J.; TARQUIS, A.: “Trends in climatic variables and future reference evapotranspiration in Duero Valley (Spain)”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(6): 1795-1805, 2011, ISSN: 1561-8633.
- 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.
- MÜLLER, C.; CRAMER, W.; HARE, W.L.; LOTZE, C.H.: “Climate change risks for African agriculture”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(11): 4313-4315, 2011, ISSN: 0027-8424.
- NC 48-35: Determinación de la lluvia máxima diaria., Inst. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba, 30 p., Vig. de 1984.
- OMM: Tiempo-Clima-Agua, [en línea], Inst. Organización Mundial de Meteorología, España, 35 p., 2009, Disponible en: <https://www.wmo.int/pages/about/documents/OMM-vistazo-es.pdf>, [Consulta: 1 de diciembre de 2019].

- Castillo *et al.*: Impacto del cambio climático en el rendimiento del maíz sembrado en suelo Ferralítico Rojo compactado
- OTEGUI, M.E.; ANDRADE, F.H.; SUERO, E.E.: “Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking”, *Field Crops Research*, 40(2): 87-94, 1995, ISSN: 0378-4290.
- PEREIRA, L.: “Challenges on water resources management when searching for sustainable adaptation to climate change focusing agriculture”, *European Water*, 34: 41-54, 2011.
- 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.
- PLANOS, G.E.; RIVERO, V.R.; GUEVARA, V.V.: “Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba”, 2013, ISSN: 9593000399.
- QUINTANA, M.C.: Estimación de las normas netas de riego del cultivo de banano, según variabilidad y cambio climático, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, Eng. Thesis, La Habana, Cuba, 64 p., 2018.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: “AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description”, *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447, 2009, ISSN: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, Ed. Estudio FAO Riego y Drenaje 66, Rome, Italy, 510 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4.
- ROSADI, R.A.B.; SENGE, M.; ITO, K.; ADOMAKO, J.: “The effect of water deficit in typical soil types on the yield and water requirement of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) in Indonesia”, *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 41(1): 47-52, 2007, ISSN: 0021-3551.
- RUIZ, P.V.; SIFUENTES, I.E.; OJEDA, B.W.; MACIAS, C.J.: “Adecuación de fechas de siembra por variabilidad climática en frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante AQUACROP-FAO, en Sinaloa”, En: IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII Aguascalientes, Aguascalientes, México, 2018.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E.: “AquaCrop—the FAO crop model to simulated yield response to water: I. Concepts and underlying principles”, *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437, 2009, ISSN: 0002-1962, e-ISSN: 1435-0645.
- STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, Ed. Estudio FAO Riego y Drenaje 66, Rome, Italy, 510 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4.
- VERDECIA, A.L.: Predicción de las normas netas de riego del tomate a cultivarse en las zonas occidental, central y oriental de Cuba en el período 2016-2050 en función de la variabilidad y el cambio climático, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), Eng. Thesis, La Habana, Cuba, 59 p., 2016.
- WANI, S.; ALBRIZIO, R.; VAJJA, N.: “Sorghum. Crop yield response to water”, En: *Irrigation and drainage paper number*, vol. 66., Ed. FAO, Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E, Raes, D. ed., Rome, Italy, pp. 144–151, 2012.
- YANG, R.Y.; TSOU, S.C.: “Enhancing iron bioavailability of vegetables through proper preparation—principles and applications”, *Journal of International cooperation*, 1(1): 107-119, 2006.

Yanira Castillo Iglesias, Profesora, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Facultad de Ingeniería Civil, UTH e-mail: yaniracastilloiglesias@gmail.com
Felicita González Robaina, Investigador Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu.

Guillermo Hervis Granda, Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptoriego12@iagric.cu.

Luis Hirán Riverol, Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail:

Enrique Cisneros Zayas, Investigador Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptoriego1@iagric.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

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