

Precipitaciones caracterizadas a futuro en áreas cultivadas de maíz y tomate en Pulido, Artemisa

Precipitation forecasts for corn and tomato crops in Pulido, Artemisa

 Carmen Duarte-Díaz*,  Julián Herrera-Puebla,  Reinaldo Cun-González y  Yoima Chaterlán-Durruthy

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

E-mail: julian.herrera@iagric.minag.gob.cu, reinaldo.cun@iagric.minag.gob.cu, yoima.chaterlan@iagric.minag.gob.cu

*Autora para correspondencia: Carmen Duarte-Díaz, e-mail: carmen.duarte@iagric.minag.gob.cu

RESUMEN: La disponibilidad futura de agua y su relación con el cambio climático es un aspecto muy difícil de interpretar a nivel global y en Cuba. Tal situación afectará la producción agrícola, lo que requiere el estudio de diferentes modelos y escenarios climáticos, a pesar de las incertidumbres que se generan en la planificación hidráulica en las demandas agrícolas. El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar las precipitaciones a futuro utilizando diferentes modelos (Hadgem3-gc31-ll, Mpi-esm1-2-hr, Mri-esm2-0), con los escenarios climáticos SS1 2.6, SSP2-4.5 y SSP5 8.5 en las áreas cultivadas de maíz y tomate en Pulido, provincia de Artemisa, según la variabilidad y el cambio climático entre 2023-2050. Se utilizó como herramienta el programa CROPWAT y se obtuvo como resultado que de los tres modelos en el Mpi con 1719,91 mm como promedio existen sobreestimaciones en las precipitaciones para el año y período óptimo de siembra del maíz y tomate en relación a los otros modelos, aunque los tres con valores inferiores a los promedios de Alquízar (289 mm) y de Pulido (253 mm). En los períodos de fecha óptima noviembre- abril con similaridad en la serie 2023-2050 en (2023-24, 2025-26 y 2030-31) que se comportaron como secos, el resto reflejó las anomalías. Las normas netas de riego promedio, estimadas para el maíz de 403.87 mm y el tomate, 395.87 para los 3 modelos y escenarios al 75% de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones se redujeron en un 84,14 y 92,06%, respectivamente, de las normas aprobadas en la actualidad.

Palabras clave: Modelos climáticos, modelado Cropwat, evapotranspiración de referencia.

ABSTRACT: Future water availability and its relationship to climate change is a very difficult aspect to interpret globally and in Cuba. This situation will affect agricultural production, necessitating the study of different climate models and scenarios, despite the uncertainties generated in water planning for agricultural demands. This study aimed to characterize future precipitation using different models (Hadgem3-gc31-ll, Mpi-esm1-2-hr, Mri-esm2-0), with climate scenarios SS1 2.6, SSP2-4.5, and SSP5 8.5 in the corn and tomato cultivated areas of Pulido, Artemisa province, based on climate variability and change between 2023 and 2050. The CROPWAT program was used as a tool and the result was that of the three models in the Mpi with 1719.91 mm as an average, there are overestimates in rainfall for the year and optimal planting period for corn and tomato in relation to the other models, although all three with values lower than the averages of Alquízar (289 mm) and Pulido (253 mm). In the optimal date periods November-April with similarity in the 2023-2050 series in (2023-24, 2025-26 and 2030-31) that behaved as dry, the rest reflected the anomalies. The average net irrigation standards, estimated for corn at 403.87 mm and tomato at 395.87 mm for the 3 models and scenarios at 75% probability of rainfall occurrence, were reduced by 84.14 and 92.06%, respectively, from the standards currently approved.

Keywords: Climate Models, Cropwat modeling, Reference Evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento del sistema climático es una realidad demostrada científicamente. Los notables impactos del cambio climático antrópico impulsan la toma de decisiones para lograr disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), considerada como la vía más efectiva para combatir el cambio climático (Planos & Gutiérrez, 2020).

En la actualidad el cambio climático representa uno de los principales problemas que enfrenta la

agricultura, debido a las alteraciones que causa en los patrones climáticos y, por tanto, en la agroclimatología relacionada con el manejo de las actividades agrícolas (Medina et al., 2016). Como resultado del aumento de los GEI en la atmósfera, se tiene un incremento en la temperatura que puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre el potencial productivo de los cultivos y sus necesidades de agua.

La producción de alimentos, la seguridad alimentaria y el cambio climático están intrínsecamente vinculados,

Recibido: 05/04/2025

Aceptado: 22/09/2025

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

Contribución de los autores: Conceptualización: C. Duarte. Curación de datos: C. Duarte. Análisis formal: C. Duarte, Julián Herrera, Y. Chaterlán, R. Cun. Investigación: C. Duarte. Metodología: C. Duarte y J. Herrera. Supervisión: C. Duarte. Validación: C. Duarte. Redacción-borrador original: C. Duarte. Redacción-revisión y edición: C. Duarte, J. Herrera.

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.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



ya sea en forma de sequías, inundaciones, huracanes o la acidificación del suelo, el cambio climático incide en todos los niveles de la producción de alimentos, así como, a la larga, en la inestabilidad en los precios de los alimentos y en la seguridad alimentaria de las comunidades agrícolas afectadas (FAO, 2016).

A menos que se establezcan medidas urgentes y sostenibles, el cambio climático seguirá ejerciendo presión sobre los ecosistemas agrícolas, fundamentalmente en las regiones y para poblaciones que son especialmente vulnerables (FAO, 2016).

Mientras, los indicadores extremos relacionados con la precipitación no muestran tendencias significativas; estudios recientes coinciden en que prevalecen las tendencias al aumento de los días secos consecutivos y la disminución de los días húmedos consecutivos para Cuba González et al. (2019) y la región del Caribe (Stephenson, 2014).

La adaptación al cambio climático en el aspecto hidrológico, se refiere esencialmente a la planificación y preparación para el incremento de la variabilidad del agua y los fenómenos climáticos extremos, incluyendo sequías e inundaciones. En los países en vías de desarrollo, con el objetivo de trazar una estrategia de adaptación apropiada, solo es posible incluyendo en los planes de desarrollo la adaptación preventiva (Planos, 2014).

Resultan de gran utilidad para estos estudios los modelos climáticos como herramienta para explorar la posible evolución futura del clima, derivados de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero según (Centella, 2017), los cuales describen un estado probable del sistema climático ante uno o más tipos de forzamientos. Según los expertos de cambio climático los escenarios SSP (Trayectorias socioeconómicas compartidas) son un instrumento básico para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras de gases de efecto invernadero.

Por ello, según Duarte et al. (2021) la predicción de las demandas de agua para riego agrícola es una necesidad insoslayable para los decisores, especialmente en el entorno de incertidumbre y riesgos del agua en el país. La gerencia cubana del agua agrícola necesita herramientas de adaptación preventiva y de decisión para realizar una mejor gestión en el medio hidrológico de Cuba a corto plazo entre 2023 y 2050.

Una alternativa básica para los estudios de planificación del agua, según Vargas et al. (2018), la cual sirve para trazar las estrategias y políticas encaminadas a mitigar y adaptarse a los efectos de las concentraciones de GEI's, es la utilización de los diferentes escenarios de cambio climático, con forzamientos radiactivos medidos como la cantidad de energía solar absorbida por metro cuadrado sobre la tierra W/m². Esta ha sido la base utilizada en los estudios presentes, asociados a los recursos hídricos disponibles para el riego. Las herramientas para evaluar

las estrategias de manera anticipada son los modelos de simulación, ya sea en los impactos del cambio climático como en la agricultura, según Bonilla (2016) y ésta es la fundamentación para evaluar el efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos y su disponibilidad a futuro para el desarrollo de los cultivos de interés agrícola, donde los escenarios constituyen un instrumento esencial para evaluar la incertidumbre de los cambios en el clima (Centella et al., 1997).

Según Planos & Gutiérrez (2020), uno de los problemas identificados en el marco de las comunicaciones nacionales de cambio climático, es la interpretación de la disponibilidad futura de agua y su relación con el cambio climático. A menudo no se considera apropiadamente cómo el impacto sobre los recursos potenciales influye en el agua aprovechable y en el agua disponible; y las medidas de adaptación se plantean en función de estos recursos, sin tener en cuenta su dependencia de los recursos potenciales.

Es necesario mejorar el conocimiento y la modelización del cambio climático en relación con el ciclo hidrológico a nivel regional y en sus dimensiones socioeconómicas. Por ello, es preciso disponer de un mayor número de datos, con un registro suficientemente largo para estimar correctamente el alcance real de la variabilidad natural. La monitorización de todas las variables relacionadas con el agua (cantidad y calidad) ayuda a la toma de decisiones y a acotar mejor las proyecciones de los modelos (Wu et al., 2008).

La utilización de programas de cómputos como el CROPWAT, para la modelación de los sistemas agrícolas, permite calcular las normas netas de riego y en éste caso para la zona occidental de Cuba durante el período 2023-2050. Esto lo hace en función de los pronósticos de variabilidad climática en el país que sean capaces de suplir las necesidades hídricas del maíz y el tomate, con la utilización de los datos climáticos del Instituto de Meteorología. Para ello toma como referencia los nuevos escenarios de emisiones para el cambio climático que se han definido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (1997). En su sexto informe se definen las vías socioeconómicas compartidas (SSP), las cuales reemplazan a las nombradas Trayectorias de Concentración Representativas (RPC).

Los recursos hídricos aprovechables son variables y dependen del balance climático e hidrológico y en la medida que el comportamiento de las precipitaciones hace que los períodos sean más secos (como está sucediendo en Cuba), la cantidad de agua potencial que se transforma en aprovechable es menor, debido al incremento de los procesos de pérdida por la evaporación y la satisfacción de las necesidades hídricas de los ecosistemas. Por tal sentido, se concibió el objetivo de caracterizar a futuro las precipitaciones, utilizando diferentes modelos y escenarios climáticos en las áreas cultivadas de maíz y tomate en Pulido, Artemisa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del objetivo de la etapa

Se abordó la obtención de las variables climatológicas a partir del procesamiento de escenarios generados por el Instituto de Meteorología **INSMET-Cuba** (2022), de los modelos climáticos globales **Hadgem3-gc31-II**, **Mpi-esm1-2-hr** y **Mri-esm2-0** para conectar predicciones de gran escala con dinámicas regionales mediante métodos de regionalización **IPCC** (1997) según **Planos & Gutiérrez (2020)**. Una vez obtenidas las variables, se procesaron mediante la metodología y hojas de cálculo elaboradas por **INSMET-Cuba** (2022), para regionalizar los valores de acuerdo con la zona de estudio según **Hawkins et al. (2013)**, los efectos del cambio climático por el Método Delta, teniendo en cuenta la media y variabilidad entre el clima actual y futuro del modelo y sumarlo a la línea base observada. De este modo todos datos diarios de las proyecciones se reconstruyen mediante un consenso de la cuadricula de la proyección, donde este ubicada el área a estudiar y los datos reales de la estación meteorológica más cercana. Luego se aplica el modelo que calcula las demandas de agua de los cultivos agrícolas con la data ya regionalizada a la climatología local. Las variables regionalizadas fueron las utilizadas para el desarrollo del presente trabajo.

Localidad del estudio

En la **Tabla 1** se muestra la selección de la localidad en estudio, donde se abarcó la región occidental del país; mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica ArcGIS (v.10.2.1) y MapInfo, para la ubicación espacial de esta localidad, tal como se muestra en la **Figura 1**.

Modelo y escenario climático

Una vez realizada la ubicación espacial, se procedió a la designación de los modelos, el escenario y la estación meteorológica más cercana, para ello se utilizaron los modelos climáticos de circulación global con alcance regional Hadgem, Mpi y Mri mencionados con anterioridad, los cuales abarcan la región del Caribe dado que estudios dedicados a las variaciones del clima hasta el presente y las proyecciones del clima futuro, partiendo de los cambios en los eventos climáticos extremos, indican un significativo incremento de los días y las noches cálidas, así como una significativa disminución de los días y las noches frías en ésta región del Caribe según **Centella & Bezanilla (2019)**; **Serrano et al. (2017)** y en Cuba en particular **Gil et al. (2020)** y **González et al. (2017)**. Estos modelos están basados en los forzamientos radiactivos de

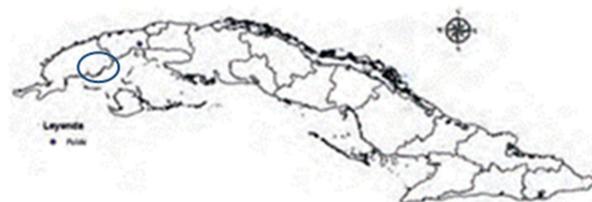


Figura 1. Localidad espacial del lugar de estudio.

varios modelos globales bajo la influencia de los escenarios SSP1 2.6, SSP2-4.5 y SSP5 8.5.

Los modelos son apoyados en leyes físicas expresadas en ecuaciones matemáticas, resueltas en rejillas con una resolución de 25x25 km y expresan las variables climáticas, temperatura máxima, media y mínima en (°C), precipitación (mm), velocidad del viento (km/h), humedad relativa (%), evapotranspiración de referencia (mm/día) y radiación global (MJ/m² día), para una línea de tiempo desde 2006 hasta 2098 aunque solo fue utilizado el período desde 2023 al 2050.

La **Tabla 2** muestra que, de un total de 28 modelos posibles, luego se revisados, procesados y recomendados por el **INSMET-Cuba (2022)**, se desestimaron 15, dejando los 13 más completos y posteriormente quedaron los tres modelos representativos, por poseer menos datos faltantes de las variables climáticas. Las tablas comparativas para cada proyección se hicieron teniendo en cuenta los períodos climáticos a futuro (2021-2040; centrado en 2030 y 2041-2060; centrado en 2050).

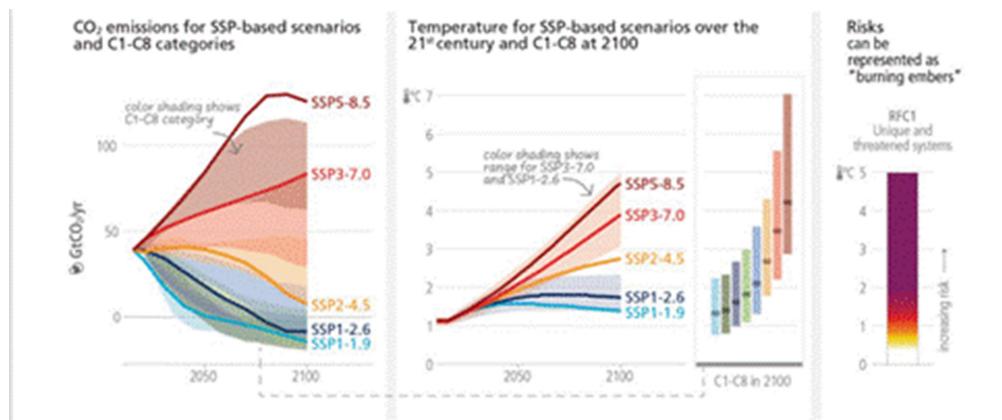
Environment and Climate Change Canada (2023) proponen que el escenario con 2,6 W/m² para el año 2100 es una reedición del escenario optimista RCP2.6 y fue diseñado con el objetivo de simular un desarrollo compatible con la meta de 2°C de temperatura. Este escenario también asume que se están tomando medidas de protección climática. Los SSP2 4.5 se estiman como actualización del escenario RCP4.5, con un forzamiento radiactivo adicional de 4,5 W/m² para el año 2100 representan la trayectoria media de futuras emisiones de gases de efecto invernadero. Este escenario asume que se están tomando medidas de protección climática. Y el escenario SSP5 8.5 considera un forzamiento radiactivo adicional de 8,5 W/m² para el año 2100, este escenario representa el límite superior del rango de escenarios descritos en la literatura. Puede entenderse como una actualización del escenario RCP8.5 de la CMIP5, ahora combinado con razones socioeconómicas. Estos escenarios pueden observarse en la **Figura 2**, así como la incidencia de los gases de efecto invernadero (GEI), las temperaturas hasta el año 2100 y los posibles riesgos que pueden predecirse en cada escenario (**IPCC, 2023**).

Tabla 1. Localidad de estudio con su coordenada

Id	Provincia	Localidad	Latitud	Longitud	Cultivo	Longitud cuadricula	Latitud cuadricula	Estación meteorológica
1	Artemisa	Pulido	22.7765	-82.6054	Maíz, Tomate	-83	23	320

Tabla 2. Modelos y escenario climático utilizados en la investigación.

Modelos / escenarios	SSP1 2.6	SSP2-4.5	SSP5 8.5
Hadgem3-gc31-ll (Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del R. U.) Inglaterra	X	X	X
Mpi-esm1-2-hr (Instituto Max Planck de Meteorología) Alemania	X	X	X
Mri-esm2-0 (Instituto de Investigaciones Meteorológicas) Japón	X	X	X

**Figura 2.** Impactos del cambio climático y riesgos relacionados con el clima, escenarios de cambio climático. Fuente: Tomada del IPCC (2023).

La estación meteorológica fue seleccionada partiendo del criterio de la proximidad a la localidad de estudio y que aparecen con su número en la **Tabla 1**, Pulido en (Alquizar, provincia Artemisa), en correspondencia con el registro de meteorología a nivel nacional.

Se realizó un análisis de la serie completa de las precipitaciones desde 2023 hasta 2050, para determinar los años hidrológicos de cada modelo, por lo que el estudio está basado en este criterio de año y período, seco, medio y húmedo. Luego del análisis general, se utilizó la metodología de NC 48-35 (1984 y Pérez & Álvarez, 2005). La caracterización de los años en función de la probabilidad de ocurrencia se determinaron los períodos (húmedo, medio y seco) sobre el 25, 50 y 75%.

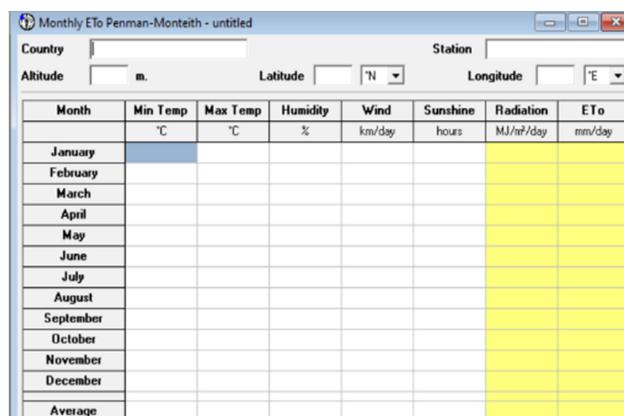
Los cultivos de referencia utilizados fueron:

Maíz. Fue utilizado como cultivo de referencia el maíz (*Zea mays* L.), la variedad HT 66, la cual posee buen potencial productivo y es resistente a la palomilla del maíz, con adaptabilidad y estabilidad en el rendimiento. Para la fecha de siembra se tuvo en cuenta el período de noviembre a abril.

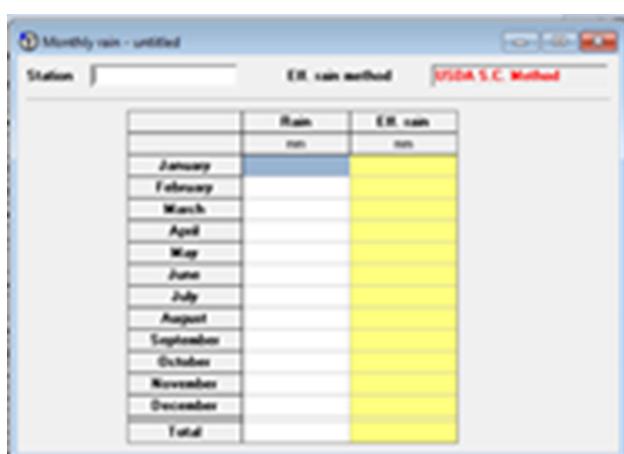
Tomate. Fue utilizado como cultivo de referencia el tomate (*Solanum lycopersicum*), variedad HC38-80, de hábito de crecimiento determinado, utilizada por muchos productores. Para la fecha de siembra se tuvo en cuenta el período de noviembre a abril.

Opciones de Cropwat versión 8.0 para determinación de las normas netas de los cultivos

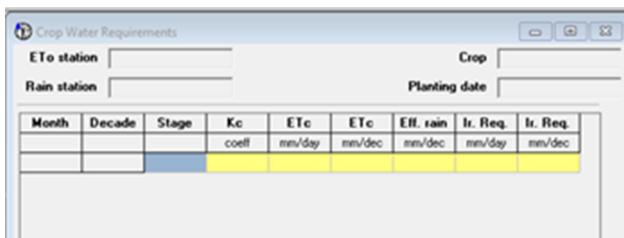
- Se estimó la evapotranspiración de referencia según los datos de las variables climáticas de los 3 modelos y escenario más restrictivo del estudio (SSP5 8.5). Se aplica el método de Penman Monthei.



- Determinación de las precipitaciones efectivas a partir de las totales de cada caso, al 75 % de probabilidad de ocurrencia, por el método USDA.



- Con los datos de los cultivos maíz y tomate indistintamente y del suelo Ferralítico Rojo compactado se determinan los requerimientos hídricos.



- Determinación de las normas del maíz y el tomate, aplicadas en el momento en que la humedad del suelo llegue al agotamiento crítico y hasta el límite superior del agua disponible en el suelo. Se tuvo en cuenta que el sistema de riego localizado en explotación tiene una eficiencia del 80%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde el año 1997 el [IPCC \(1997\)](#), recomendó reducir la vulnerabilidad potencial de los sistemas hídricos frente al cambio climático. Algunas de las posibilidades se basaban en la determinación de las tarifas, las iniciativas orientadas a la eficiencia hídrica, las mejoras de ingeniería y estructurales en la infraestructura del suministro de agua, las políticas agrícolas y la planificación/gestión urbanística. A nivel nacional y o regional, sería prioritario dar más preponderancia a la gestión integrada e intersectorial de los recursos hídricos, utilizando las cuencas fluviales como unidades de gestión de recursos, o fomentar unas prácticas de determinación de precios y de gestión apropiada. Estas recomendaciones en la actualidad, aún sin concretar en toda su extensión por vacíos en las investigaciones [IPCC \(2023\)](#), hacen que sean válidas las que se realizan en función del comportamiento de las precipitaciones en cada zona de estudio, para una mayor comprensión de la gerencia en los gestores del agua, incluidos los demandantes de los recursos hídricos.

Estudio de las precipitaciones

Utilizando los valores climáticos de los escenarios SSP1 2.6, SSP2-4.5 y SSP5 8.5 de los modelos **Hadgem3-gc31-ll**, **Mpi-esm1-2-hr** y **Mri-esm2-0**, se muestran los resultados que representan al clima futuro en función de las precipitaciones para el área de estudio de Pulido, Alquizar en la provincia Artemisa desde el año 2023 hasta el 2050.

Modelo Hadgem3-gc31-ll

En la [Figura 3](#) se presentan los comportamientos de las precipitaciones anuales para el período futuro a mediano plazo (2023-2050) bajo el escenario SSP1 2.6, del modelo Hadgem en la localidad de Pulido en Alquizar, provincia Artemisa. El caso ([Figura 3a](#)) se corresponde con el análisis del período de siembra del tomate y el maíz de noviembre a abril.

Se observa, que en el caso (b) para SSP1 2.6 las precipitaciones anuales transitan desde un máximo de 2169,1 en 2036 mm hasta 1257 mm en el año 2033 como el más seco de la serie. Se presenta con 1819 mm el año húmedo hidrológicamente en el 2025 correspondiente al 25 % de probabilidad de ocurrencia, representando el 83,85 % del año más húmedo y con 1529,19 mm en el año seco en el 2040 con el 70,49 % de las precipitaciones del año más húmedo. Sin embargo, si se analiza el período de desarrollo de los cultivos de maíz y tomate desde noviembre a abril se aprecia en la [figura 3a](#) en el mismo escenario durante la serie de 27 años, el seco corresponde al 2039-40 con 357,73 mm, coincidiendo con parte del año seco de la serie anual, durante el 2036-37 se desarrolla el período medio con 492,26 mm de precipitaciones y un período húmedo entre el 2031-32 con 574,95 mm. De acuerdo a la [Tabla 3](#) los coeficientes de variación indican la baja variabilidad de los datos que se desvían alrededor de la media y se considera la estimación con precisión aceptable, además según [Centella et al. \(1997\)](#) así como [Naranjo & Centella \(1998\)](#) el incremento de la variabilidad anual de las precipitaciones, ocurrido a partir de la década de los años 70 está asociado a cambios en los patrones de circulación sobre la región del Caribe y el Golfo de México,

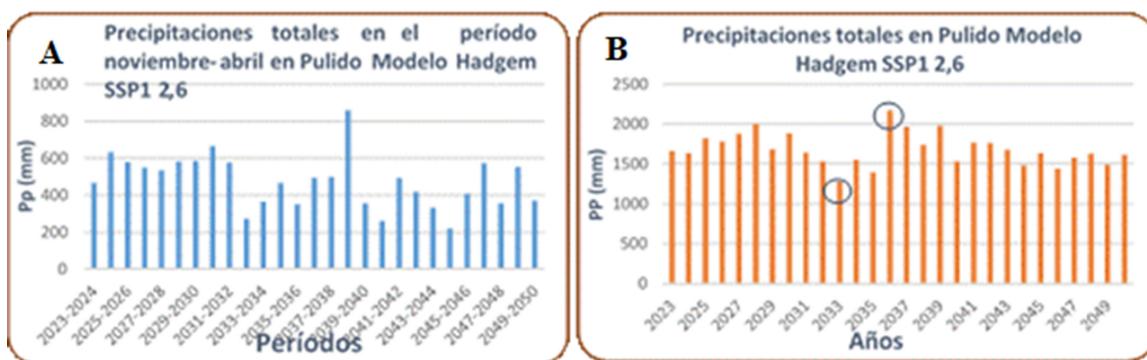


Figura 3. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización de los escenarios SSP1 2.6 en Pulido.

Tabla 3. Comparación integral de la precipitación en mm, entre el modelo Hadgem, los escenarios y probabilidad de ocurrencia.

Modelo	Escenario	Pp máx (año)	Pp mín. (año)	Pp Total 25%	Pp Total 50%	Pp Total 75%	Pp Periodo 25%	Pp Periodo 50%	Pp Periodo 75%
Hadgem	SSP1 2.6	2169,71 (2036)	1275,7 (2033)	1819 (2025)	1658,95 (2023)	1519 (2040)	574,95 (2031-32)	482,26 (2036-37)	357,73 (2039-40)
	SSP2 4.5	2118,34 (2035)	1241,7 (2025)	1746,52 (2037)	1607,41 (2030)	1473,25 (2045)	532,67 (2043-44)	446,85 (2029-30)	339,27 (2030-31)
	SSP5 8.5	2109,76 (2039)	1246,25 (2025)	1759,66 (2047)	1555,39 (2043)	1380,89 (2038)	469,87 (2024-25)	412,55 (2025-26)	376,34 (2023-24)
	Promedio	2132,60	1254,55	1775,06	1607,25	1457,71	525,83	447,22	357,78
	ES \pm	42,39	20,82	41,96	73,23	70,35	74,30	49,29	13,16
	CV	1,99	1,66	2,36	4,56	4,83	14,13	11,02	3,68

Leyenda Pp precipitaciones

corroborando lo que se muestra el comportamiento para la zona occidental de Cuba, representado por la provincia de Artemisa.

En el propio modelo Hadgem, en el escenario SSP2 4.5 en la [Figura 4](#), así como en la [tabla 4](#) pueden observarse que, el comportamiento de las precipitaciones anuales (b) varió entre 1241,7 mm (año 2025) seco, coincidiendo con los resultados de [Chaterlán et al. \(2022\)](#), con el modelo PRECIS y escenario RCP 4.5.

El año húmedo de la serie total es 2035 con 2118,34 mm, aunque hidrológicamente el año húmedo al 25 % de la probabilidad de lluvia fue 2037 con 1746,52 mm, el medio 2030 con 1630,41 mm y el seco 2045 con 1473,25 mm, mientras que las precipitaciones del período seco 2030-31 con 339,27 mm, en el medio entre el 2029-30 con 446,85 mm coincidiendo con parte del año medio y 532,67 en el período húmedo 2043-44.

El caso del escenario SSP5 8.5 en la [Figura 5](#), se aprecian el comportamiento de las precipitaciones totales anuales comparadas con las del período de siembra de los cultivos estableciéndose las diferencias de distribución que permiten demostrar la variabilidad de la misma y la necesidad de ajustarse para el riego a los datos del comportamiento más específico del período de siembra lo cual se complementa en la [Tabla 3](#).

Se transita por precipitaciones que van desde 1246,25 mm en el año 2050 coincidiendo con los resultados de [Hidalgo et al. \(2024\)](#), como el más seco hasta el año 2039 con 2109,76 mm como el más húmedo de la serie, está representado el año 2038 con 1380,89 mm dentro del año seco con el 75 % de probabilidad de ocurrencia, con 1555,39 mm en 2043 como año medio y 2047 con 1759,66 mm el año húmedo al 25% de probabilidad de ocurrencia de la lluvia. No obstante, el período húmedo está

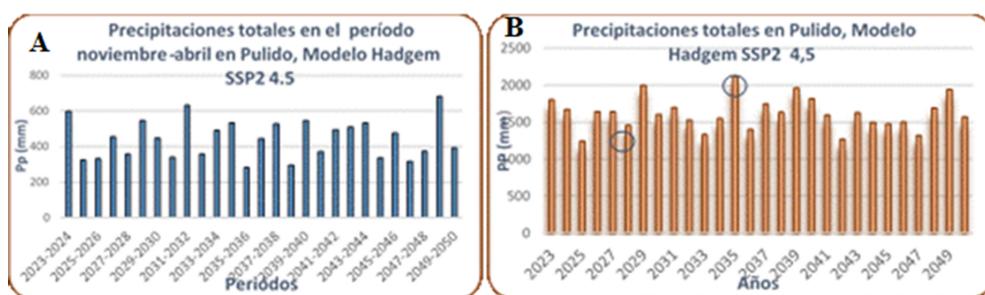


Figura 4. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SP2-4.5 en Pulido.

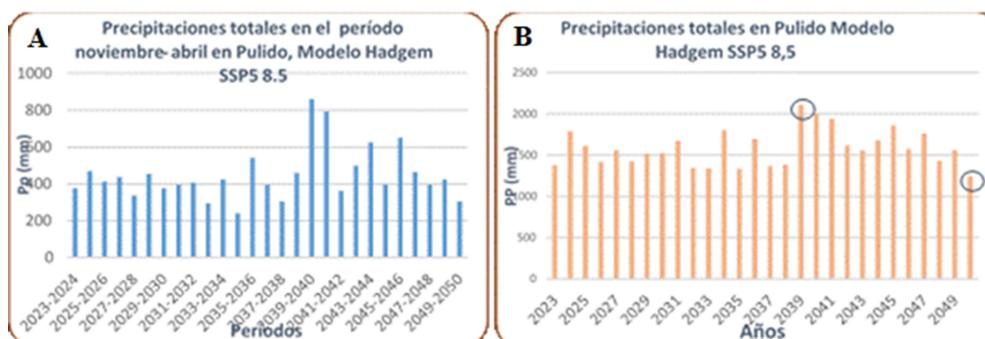


Figura 5. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SSP5 8.5 en el modelo Hadgem en Pulido.

representado por el 2024-25 con 468,87 mm, el medio con 412,55 mm entre el 2025-26 y el más seco es el período 2023-24 con 376,34 mm con el 75 % de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones.

Modelo Mpi-esm1-2-hr

En la [Figura 6](#), se presenta el comportamiento de la precipitación anual para el período futuro a mediano plazo (2023-2050) bajo los tres escenarios SSP1 2.6 del modelo **Mpi-esm1-2-hr** en la localidad de Pulido en Alquízar.

Las precipitaciones totales en el modelo Mpi y escenario SSP1 2.6, tienen un comportamiento con un máximo de 2080,82 mm en el año 2025 y un mínimo en el 2043 con 1251,79 mm. En la [Figura 6b](#) se aprecia que hidrológicamente al 25% de probabilidad de ocurrencia, el año húmedo es 2029 con 1888,73 con el 91 % del mayor valor de precipitaciones, el año medio está representado en el 2031 (1745,79 mm) y el seco en el 2042 con 1618,24 mm. No obstante, el período seco se aprecia entre 2025-26, el medio 2031-32 y el húmedo 2038-39.

Analizando el modelo Mpi y escenario SSP2 4.5, en la [Figura 7b](#) y [Tabla 4](#), se aprecia que el año más húmedo de la serie es el 2048 con 2140,88 mm anuales y el más seco 2023 con 1351,92 mm, para el 75% de probabilidad de ocurrencia el año 2029 tiene 1568,97 mm, el 2041 con el 50 % tiene 1672,25 y el del 25 % es el año 2040 con 1932,11 mm de precipitación siendo éste año el más húmedo dentro de los años hidrológicos. En cuanto a los períodos el más seco al 75% de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones es el 2040-41 con 346,89 mm, el medio 2030-31, con 421,25 mm y el más húmedo 2034-35 con 567,36 mm.

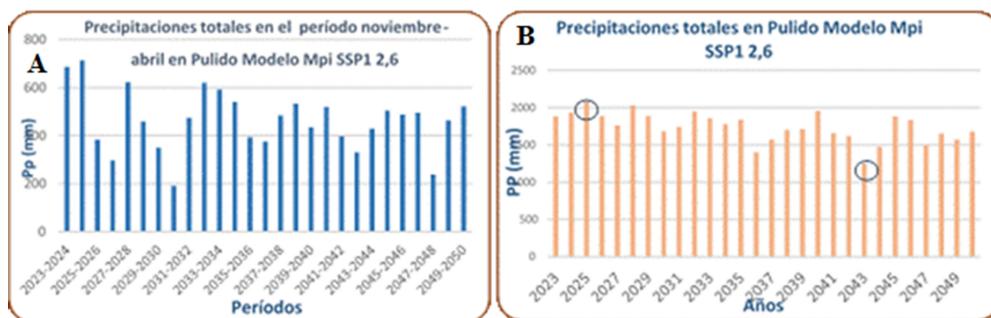


Figura 6. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SSP1 2.6 en el modelo Mpi en Pulido.

Tabla 4. Comparación de la precipitación entre el modelo Mpi, escenarios y probabilidad de ocurrencia.

Modelo	Escenario	Pp máx (año)	Pp mín. (año)	Pp Total 25%	Pp Total 50%	Pp Total 75%	Pp Periodo 25%	Pp Periodo 50%	Pp Periodo 75%
Mpi	SSP1 2.6	2082,86 (2025)	1251,79 (2043)	1888,73 (2029)	1745,79 (2031)	1618,24 (2042)	532,35 (2038-39)	474,57 (2031-32)	384,27 (2025-26)
	SSP2 4.5	2140,88 (2048)	1351,92 (2023)	1932,11 (2040)	1672,25 (2041)	1568,97 (2029)	567,36 (2034-35)	421,25 (2030-31)	346,89 (2040-41)
	SSP5 8.5	1947,27 (2033)	1418,12 (2045)	1828,47 (2039)	1759,42 (2023)	1656,97 (2024)	566,55 (2031-32)	492,59 (2035-36)	386,05 (2025-26)
	Promedio	2057,00	1334,96	1883,10	1725,82	1614,73	555,42	483,58	372,40
	ES \pm	95,88	117,61	42,61	9,64	27,39	24,18	12,74	1,26
Leyenda Pp precipitaciones									

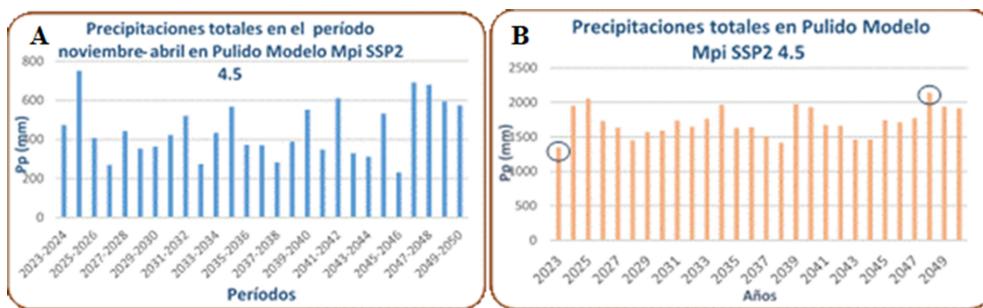


Figura 7. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SSP2 4.5 en modelo Mpi, en Pulido.

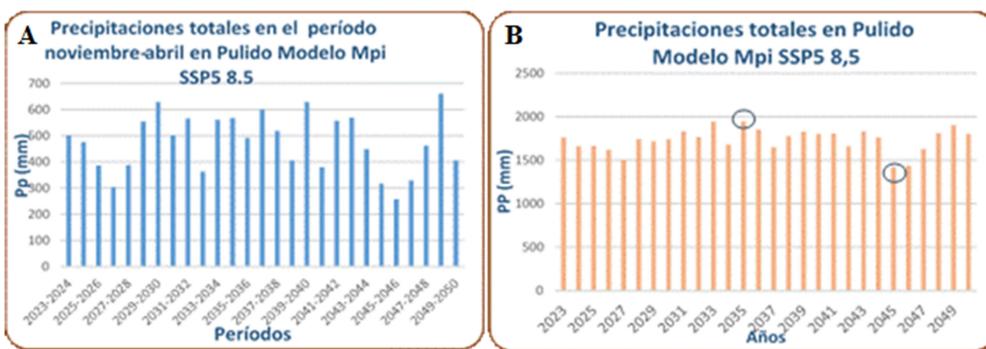


Figura 8. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SSP5 8.5 en modelo Mpi, en Pulido.

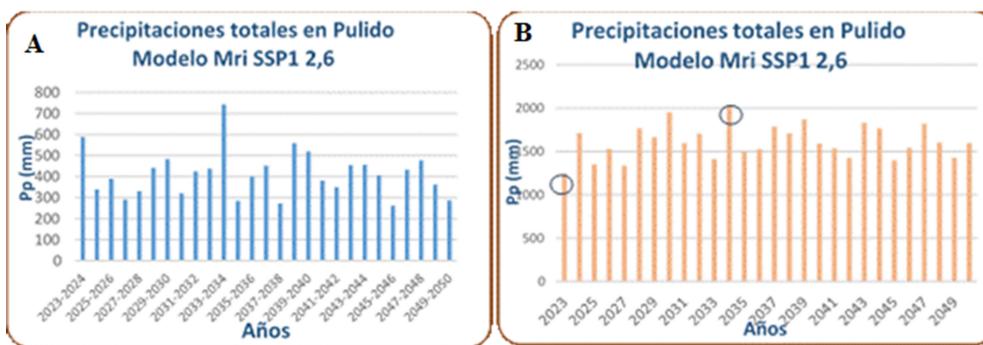


Figura 9. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SSP1 2.6 en modelo Mri, en Pulido.

En el estudio de los períodos hidrológicos el más seco será 2027-28 con 331,11 mm, el medio 2044-45 con 407,39 mm y el más húmedo 2043-44 con 456,23 mm, sin coincidencia con los años hidrológicos seco, medio y húmedo del análisis anterior.

En el modelo Mri y escenario SSP2 4.5, según Figura 10 y a su vez ampliado en la Tabla 5, el año 2037 es el más húmedo con 2216,18 mm y el más seco es 2048 con 1387,2 mm. Para el 25% de probabilidad de ocurrencia el año 2029 es el más húmedo con 1703,05 mm, el medio es 2042 con 1560,43 mm y el seco con el 75% de probabilidad de ocurrencia es el 2029 con 1708,05 mm.

Según los períodos hidrológicos en función de la fecha de siembra en la Figura 10a, se representa el período seco será entre 2034 y 2035 con 319,73, el medio

2042-43 con 366,02 mm coincidiendo con el año medio y el húmedo 2038-39 con 482,80 mm, sin coincidencia con el año hidrológico.

El modelo Mri y escenario SSP5 8.5, según Figura 11 y lo representado en la Tabla 5, transita por un máximo de precipitaciones en el año 2028 con 2053,39 mm y un mínimo en el 2026 con 1311,38 mm. Desde el punto de vista hidrológico el año más seco será el 2044 con 1469,51 mm, el medio 2029 con 1574,72 mm y el más húmedo 2032 con 1729,07 mm al 25% de probabilidad de ocurrencia de la lluvia.

En cuanto a los períodos hidrológicos el más seco o al 75% de probabilidad de ocurrencia se aprecia en 2026-27 con 326,34 mm, el medio 2025-26 con 403,04 mm y el húmedo 2035-36 con 326,34 mm.

Tabla 5. Comparación de la precipitación entre el modelo Mri, escenarios y probabilidad de ocurrencia.

Modelo	Escenario	Pp máx (año)	Pp mín. (año)	Pp Total 25%	Pp Total 50%	Pp Total 75%	Pp Periodo 25%	Pp Periodo 50%	Pp Periodo 75%
Mri	SSP1 2.6	2030,34 (2034)	1245,90 (2023)	1766,38 (2028)	1596,45 (2050)	1429,28 (2049)	456,23 (2043-44)	407,39 (2044-45)	331,11 (2027-28)
	SSP2 4.5	2216,18 (2037)	1387,20 (2048)	1703,05 (2029)	1560,43 (2042)	1478,72 (2033)	482,8 (2038-39)	366,02 (2042-43)	319,73 (2034-35)
	SSP5 8.5	2053,39 (2028)	1311,38 (2026)	1729,07 (2032)	1574,72 (2029)	1469,51 (2044)	465,2 (2035-36)	403,04 (2025-26)	326,34 (2026-27)
	Promedio	2099,97	1314,83	1732,83	1577,20	1459,17	468,07	392,15	325,73
	ES \pm	16,30	46,30	26,38	15,37	28,45	6,34	3,08	3,37
	CV	0,78	3,52	1,52	0,97	1,95	1,36	0,78	1,04

Leyenda Pp precipitaciones.

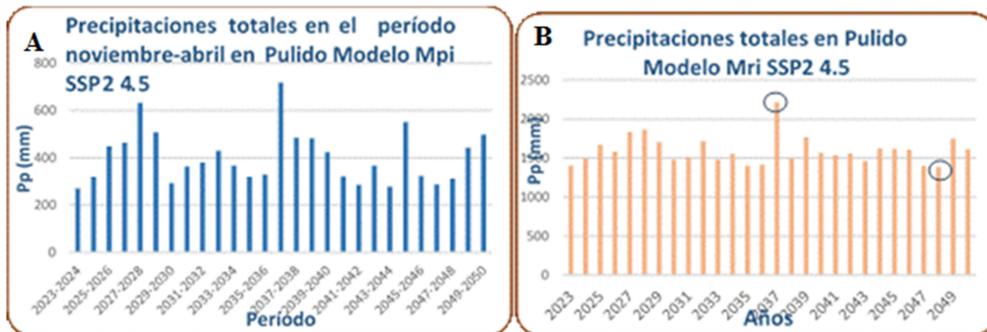


Figura 10. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SSP2 4.5 en modelo Mri, en Pulido.

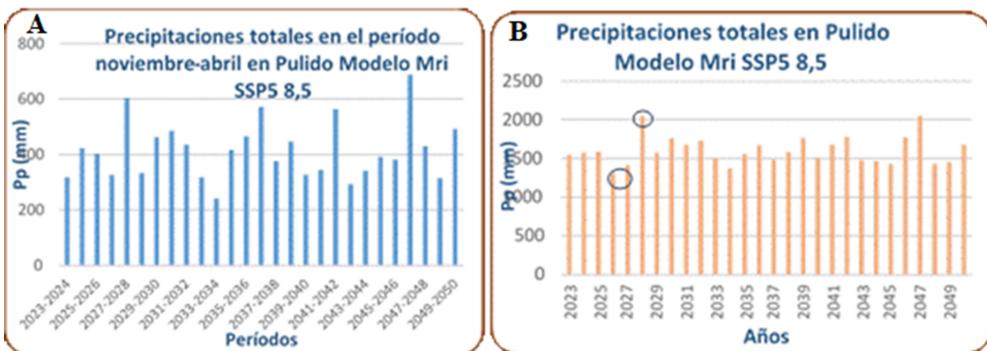


Figura 11. Precipitación para el período noviembre- abril (A) y anual (B) a futuro desde 2023 al 2050 con la utilización del escenario SSP5 8.5 en modelo Mri, en Pulido.

Si se tiene en cuenta el estudio del tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán por [Boudet \(2015\)](#) en correspondencia con el comportamiento general de las precipitaciones en Cuba y las características físico geográficas de esta área en el período poco lluvioso, los acumulados anuales medios alcanzan 1365 mm y los extremos mínimo y máximo 960 mm y 1831 mm, respectivamente, con el modelo ECHAM4. Los presentados con los modelos Hadgem, Mpi y Mri se encuentran en el entorno de los mismos para la zona occidental.

De acuerdo a la [Tabla 3](#) los coeficientes de variación indican la baja variabilidad de los datos que se desvían alrededor de la media y se considera la estimación con precisión aceptable.

De los tres modelos estudiados, el Mpi según la [Tabla 6](#) es el que tiene los valores de precipitaciones más sobreestimados con 1719,91 mm como promedio y el Mri los más bajos (1603,73 mm). Los modelos Hadgem y Mri poseen valores promedios muy similares de la serie de 27 años de estudio.

Tabla 6. Comparación de las precipitaciones promedios de los tres modelos por cada uno de los 3 escenarios en estudio.

Modelo	Pp SSP1 2.6 (mm)	Pp SSP2 4.5 (mm)	Pp SSP5 8.5 (mm)	Promedio (mm)
Hadgem	1684,86	1619,23	1588,72	1630,94
Mpi	1712,39	1717,57	1732,78	1719,91
Mri	1614,52	1596,19	1603,48	1604,73

Si se toma como valor límite la media de precipitación de Cuba, se puede asumir que se encuentran por encima de 1335 mm, según el [Servicio Hidrológico Nacional \(2006\)](#), se puede apreciar que las medias se encuentran sobre los 1630,94 mm, 1719,91 mm y 1603,48 mm promediados de los escenarios SSP1 2.6, SSP2 4.5 y SSP5 8.5, respectivamente, lo que ratifica las mencionadas anomalías de las precipitaciones hacia el 2050 definidas por [Planos et al. \(2014\)](#).

Se aprecian en las Figuras desde la 3 a la 11, donde no siempre hay coincidencia entre la categoría del año y del período ya sea seco, medio y o húmedo, por lo que, para el caso de la determinación de las normas netas de los cultivos de tomate y maíz, en base al balance hídrico del sistema, debe utilizarse el período hidrológico teniendo en cuenta su etapa de crecimiento y desarrollo y por tanto el agua que demanda para su ciclo.

Según la [Tabla 7](#), se comprueba el período 2023-24 como seco con dos de los modelos estudiados (Hadgem y Mri) al 75 % de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones. Además, si se tiene en cuenta el promedio histórico de las precipitaciones en Alquízar, según el [Grupo Empresarial Agropecuario y Forestal Artemisa \(2023\)](#), del período seco (noviembre- abril) es de 289,69 mm y la precipitación histórica de 8 años de la localidad de Pulido que es de 253,33 mm para el período del cultivo [Herrera \(2025\)](#), el volumen de precipitación observada y con predicción para 2023-24 y con predicción a futuro para los períodos 2025-26 y 2030-31, poseen valores superiores al promedio histórico de forma independiente y como promedio de los 6 períodos secos (385,02 mm), aunque

clasifican como período seco para los tres modelos al 75% de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones.

Se aprecia, además, las anomalías hacia el 2050 donde los períodos de noviembre a abril se comportan como húmedos como se aprecian entre 2031-32, 2038-39 y 2043-44, los cuales se repiten en los diferentes modelos y escenarios, según se acerca al año 2050.

Normas de riego según Resol 17/2020, para el riego del tomate y el maíz en Pulido, provincia de Artemisa

Se estimaron las normas para el riego del tomate y el maíz, solo para el 75% de probabilidad de ocurrencias de las precipitaciones en los tres modelos y escenario SSP5 8.5, teniendo en cuenta que es el entorno más restrictivo o desfavorable desde el punto de vista de la disponibilidad de agua a partir de las precipitaciones, además los niveles actuales de CO₂ se duplicaran según [Januta \(2021\)](#) y se elevan las temperaturas y las radiaciones. Estas normas se compararon con las normas netas para el riego que aparecen en la Resol 17/2020 del INRH [GOC-Cuba \(2020\)](#), para los cultivos de tomate y maíz en la provincia de Artemisa ([Tabla 8](#)).

Se observó que tanto para el tomate, como para el maíz las normas netas estimadas según el programa CROPWAT 8.0, son menores que las que actualmente se encuentran en la Resolución 17/2020 del INRH [GOC-Cuba \(2020\)](#), entre el 92 y 84%, respectivamente, lo que podría explicarse como parte de la influencia del clima cambiante, por lo que habrá que ajustarlas en función de la disponibilidad del agua en el suelo en su balance hídrico, teniendo en cuenta las precipitaciones totales y efectivas.

Tabla 7. Similaridad entre los períodos hidrológicos en Pulido para los modelos Hadgem, Mpi y Mri y los tres escenarios.

Período	Modelo	Escenario	% Probabilidad Pp	Vpp (mm)	Categoría
2023-2024	Hadgem	SSP5 8.5	75 %	376,34	seco
	Mri	SSP1 2.6	75 %	376,30	
2025-2026	Hadgem	SSP5 8.5	50 %	412,55	seco
	Mpi	SSP1 2.6	75 %	384,17	
	Mpi	SSP5 8.5	75 %	386,05	
	Mri	SSP5 8.5	75 %	384,27	
2030-2031	Hadgem	SSP2 4.5	75 %	339,27	seco
	Mpi	SSP2 4.5	75 %	421,25	
2031-2032	Hadgem	SSP1 2.6	25 %	574,95	húmedo-medio
	Mpi	SSP1 2.6	50 %	421,25	
	Mri	SSP5 8.5	50 %	474,57	
2038-2039	Mpi	SSP1 2.6	25 %	532,35	húmedo
	Mri	SSP2 4.5	25 %	482,80	
	Mri	SSP5 8.5	25 %	532,35	
2043-2044	Hadgem	SSP2 4.5	25 %	532,67	húmedo

Tabla 8. Comparación entre la norma neta total estimada en los cultivos de tomate y maíz en Pulido, Artemisa y la aprobada en la Resolución 17/2020 del INRH [GOC-Cuba \(2020\)](#).

Cultivo	Modelo/ escenario SSP5 8.5	Probabilidad precipitación (%)	Norma neta (mm)	
			Nn estimada CROPWAT	Nn Resol/2020
Tomate	Hadgem 3	75 (2023-24)	408,8	430,0
		75 (2025-26)	402,5	
		75 (2025-26)	376,3	
Maiz	Hadgem 3	Promedio	395,87 (92,06%)	430,0
		75 (2023-24)	420,9	480,0
		75 (2025-26)	400,6	
		75 (2025-26)	390,1	
		Promedio	403,87 (84,14%)	480,0

CONCLUSIONES

- De los tres modelos estudiados, el Mpi es el que tiene los valores de precipitaciones más sobreestimados con 1719,91 mm como promedio y el Mri los más bajos (1603,73 mm).
- Los períodos de desarrollo del maíz y tomate en fecha noviembre- abril con similaridad en la serie 2023-2050 (2023-24, 2025-26 y 2030-31) se comportaron como secos teniendo en los modelos Hadgem, Mpi y Mri, en los 3 escenarios, al 75% de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones.
- Las normas netas de riego promedio, determinadas para el maíz de 403,87 mm y el tomate 395,87 para los 3 modelos y escenarios al 75% de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones, se reducen en un 84,14 y 92,06%, respectivamente, de las normas aprobadas en la actualidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bonilla, A. (2016). Modelos de simulación y herramientas de modelaje. Elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícola (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Resiliencia, Proyecto Insignia, Unión Europea.
- Boudet, R. D. (2015). Impacto del cambio climático en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán en el período 2021-2050 [Tesis en opción al título de Master en Geografía, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial]. Universidad de la Habana Facultad de Geografía., La Habana, Cuba.
- Centella, A. (2017). La estimación del clima futuro y los escenarios climáticos [Parte 1 y 2] [Informe del Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba]. Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba.
- Centella, A., & Bezanilla, A. (2019). High spatial resolution climate change scenarios for Belize (p. 37) [Informe de consultoría en apoyo a la Cuarta Comunicación Nacional de Belice sobre el cambio climático]. Instituto de Meteorología de Cuba.
- Centella, A., Llanes, J., & Paz, L. (1997). Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC). Fondo para el Medio Ambiente Mundial, PNUD.
- Chaterlán, Y., Duarte, C., Riverol, L. H., & Zamora, E. (2022). Caracterización a futuro de las precipitaciones y la evapotranspiración de referencia, en diferentes zonas de Cuba. Ingeniería Agrícola, 12(4).
- Duarte, D., Carmen E., Zamora, E., Herrera, J., & González, F. (2021). Manejo de las normas netas totales de riego en el frijol ante el cambio climático. Ingeniería Agrícola, 11(4), 3-9.
- Environment and Climate Change Canada. (2023). CMIP6 and Shared Socioeconomic Pathways overview. Climate Scenarios. Canada*, K. <https://ClimateScenarios.Canada.ca/?Page=cmip6-OverviewNotes>
- FAO. (2016). Las legumbres y el cambio climático. FAO, Rome, Italy.
- Gil, L., González, I., Hernández, D., & Álvarez, M. (2020). Extremos climáticos de temperatura y su relación con patrones atmosféricos de tele conexión durante el invierno. Revista Cubana de Meteorología, 26(4).
- GOC-Cuba. (2020). “Resolución 17- 2020 Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)” (p. GOC 2020-557-061, 2020) [Resolución 17, 2020]. Gaceta Oficial de la República de Cuba, La Habana, Cuba.
- González, F., Cisneros, E., Herrera, J., López, T., & Cid, G. (2019). Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max* L) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico. Ingeniería Agrícola, 9(1).
- González, G. I. T., Barcia, S. S., & Hernández, G. D. (2017). Comportamiento de Indicadores de extremos climáticos en la Isla de la Juventud. Revista Cubana de Meteorología, 23(2), 217-225.
- Grupo Empresarial Agropecuario y Forestal Artemisa. (2023). Actualización programa desarrollo de las cooperativas altamente productivas de Alquízar [Informe 2023]. Grupo Empresarial Agropecuario y Forestal Artemisa (GEAFA), Alquízar, Artemisa, Cuba.
- Hawkins, E., Osborne, T. M., Ho, C. K., & Challinor, A. J. (2013). Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. . . Agricultural and Forest Meteorology, 170, 19-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.007>
- Herrera, J. (2025). Procesamiento de la variable de precipitación de la estación de Alquizar, Pulido desde 2016-2024 [Informe del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric)]. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana, Cuba.
- Hidalgo, M. A., Pérez, G. R., & Cruz, I. T. (2024). Proyección de los regímenes de temperatura y precipitación en la provincia Holguín, Cuba a partir del modelo climático HadGEM-ES. Revista Cubana de Meteorología, 30(3).
- INSMET-Cuba. (2022). Recomendaciones y participación en el Proyecto PN211LH009-0023, del IAgriC, denominado “Efecto del cambio climático sobre las demandas de agua de los cultivos agrícolas en Cuba y de su potencial de rendimiento bajo riego (No. Proyecto PN211LH009-0023)”. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana, Cuba.
- IPCC. (1997). Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas [Informe especial del IPCC impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad].
- IPCC. (2023). Sexto Informe de Evaluación. Informe de Síntesis. IPCC.

- Januta, A. (2021). . ¿Qué significan los 5 futuros del informe de la ONU sobre el clima?. [Informe Panel climático de la UNU]. Organización de las Naciones Unidas.
- Medina, G., Ruiz, J. A., Rodríguez, V. M., Soria, J., Díaz, G., & Zarazúa, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE13), 2465-2474.,
- Naranjo, L. Y. A., & Centella, A. (1998). Recent trends in the climate of Cuba. Royal Meteorological Society, *Weather*, 53(3).
- NC 48-35. (1984). Determinación de la lluvia máxima diaria (p. 30). Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- Pérez, R., & Álvarez, M. (2005). Necesidades de Riego de la Caña de Azúcar en Cuba. Editorial Academia-IIRD, Formato digital. C. Habana, Cuba, Capítulos, 2(3), 4.
- Planos, E. O. (2014). Síntesis informativa sobre impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba. Sello Editorial AMA, La Habana, Cuba.
- Planos, E. O., & Gutiérrez, T. L. (2020). Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. La Habana, Cuba. AMA Sello Editorial, La Habana, Cuba.
- Planos, O. E., Guevara, V., & Fernández, N. (2014). Guía metodológica para los estudios integrados de impacto del cambio climático y las medidas de adaptación en Cuba [Marco conceptual]. Centro del Clima del Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
- Serrano, S., Ruiz, J. C., & Bersosa, F. (2017). Heavy rainfall and temperature projections in a climate change scenario over Quito, Ecuador. La Granja. *Revista de Ciencias de la Vida*, 25(1).
- Servicio Hidrológico Nacional. (2006). La media de precipitación de Cuba. Instituto de Meteorología de la República de Cuba (INSMET), La Habana, Cuba.
- Stephenson, T. S. (2014). Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961-2010. Publisher: International Journal of Climatology, 34 (9), 2957-2971.
- Vargas, R. del C., Sánchez, G., & Rolón, J. (2018). Proyecciones de cambio en la precipitación mediante Vías De Concentración Representativas a Nivel Cuenca. Universidad Autónoma de Tamaulipas, 1-16.
- Wu, S., Bates, B., Australia, C., Kundzewicz, Z., & Palutikof, J. (2008). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático OMM PNUMA el Cambio Climático y el Agua.