

Simulation of the impact of climate variability and change on potato production in the Azacualpa village, Francisco Morazán, Honduras

Abstract— This study analyzes the impact of climate variability and climate change on potato production in Azacualpa, Francisco Morazán, Honduras, using historical meteorological data from local stations and reanalysis products (ERA5-Land and ERA5-Ag), as well as climate projections for 2050 under the RCP 6.0 scenario. The AquaCrop® model was applied to simulate crop performance under both rainfed and irrigated conditions across different ENSO phases (Niño, Niña, and Neutral years). The results indicate that under rainfed conditions, potato yields decrease markedly during the dry season, with reductions reaching up to 61.44%, reflecting significant water limitations. In contrast, irrigation helps maintain more stable yields, ranging between 35 and 42 t/ha, reducing the impact of climate variability, although some declines are still observed during the Niño events. Projections for 2050 suggest rising temperatures and changes in precipitation patterns, leading to an estimated overall yield reduction of about 6.12% even under irrigated conditions. Overall, the findings highlight the sensitivity of potato production to both climate variability and long-term climate change, while emphasizing the importance of irrigation and adaptive management practices to strengthen agricultural resilience in the region.

Keywords-- Irrigation, precipitation, simulation model, temperature

Simulación del impacto de la variabilidad y el cambio climático en la producción de papa en la aldea Azacualpa, Francisco Morazán, Honduras

Soledad Andrea Cruz Solíz¹ ; Diego Obando Bonilla² ; Alexandra Maribel Manueles Lorenzo 
^{1,3,2}Universidad Zamorano, Honduras, soledad.cruz@est.zamorano.edu, amanueles@zamorano.edu, dobando@zamorano.edu

Resumen– Este estudio analiza el impacto de la variabilidad climática y el cambio climático en la producción de papa en Azacualpa, Francisco Morazán, Honduras, utilizando datos meteorológicos históricos de estaciones locales y productos de reanálisis (ERA5-Land y ERA5-Ag), así como proyecciones climáticas para el año 2050 bajo escenario RCP 6.0. El modelo AquaCrop se aplicó para simular el desempeño del cultivo bajo condiciones de secano y de riego en diferentes fases del ENSO (años Niño, Niña y Neutrales). Los resultados indican que, bajo condiciones de secano, los rendimientos de papa disminuyen notablemente durante la estación seca, con reducciones que alcanzan hasta un 61.44% lo que refleja importantes limitaciones hídricas. En contraste, el riego ayuda a mantener rendimientos más estables, entre 35 y 42 t/ha, reduciendo el impacto de la variabilidad climática, aunque aún se observan algunas disminuciones durante eventos de Niño. Las proyecciones para 2050 sugieren un aumento de las temperaturas y cambios en los patrones de precipitación, lo que conduce a una reducción estimada del rendimiento de aproximadamente 6.12% incluso bajo condiciones de riego. En general, los hallazgos destacan la sensibilidad de la producción de papa tanto a la variabilidad climática como al cambio climático a largo plazo, al tiempo que enfatizan la importancia del riego y de prácticas de manejo adaptativas para fortalecer la resiliencia agrícola en la región.

Palabras clave-- Modelo de simulación, precipitación, riego, temperatura

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una amenaza importante para el sector agrícola, puesto que afecta la accesibilidad y uso eficiente de los recursos, lo que termina limitando la productividad [1, 2]. Aunque el aumento de precipitación y temperaturas inicialmente estimula el crecimiento vegetal, a largo plazo, impacta negativamente en los sistemas agrícolas al incrementar la tasa de respiración y la evapotranspiración de los cultivos, favoreciendo la proliferación de plagas y reduciendo la duración de los ciclos de cultivo [3].

En esa línea, las siguientes referencias [4], [5] y [6] han desarrollado estudios en diferentes partes del mundo como Perú, España y China, con el objetivo de evaluar el comportamiento del rendimiento agrícola mediante el uso de modelos de simulación de cultivo como: AquaCrop®, Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT® por sus siglas en inglés), entre otros. Estos modelos han sido utilizados como herramientas clave para estimar el impacto de variables como el clima, las

características del suelo y las prácticas de manejo agronómico sobre la productividad.

Honduras es un país vulnerable a desastres relacionados con el clima [7]. La agricultura, al ser el principal sector económico del país, presenta una alta vulnerabilidad frente a los impactos del cambio climático [8]. A nivel mundial la papa representa el cultivo no cerealero más relevante, debido a su alto volumen de producción y su papel fundamental en la seguridad alimentaria [9]. En Honduras la producción de papa tiene un impacto social y económico, siendo un componente clave en la canasta básica y una fuente de empleo [10]. Este cultivo se constituye como una de las principales fuentes de ingresos para las comunidades de las zonas montañosas de Honduras. Cada año se siembran cerca de 3,000 mz, equivalentes a 2,100 ha, bajo la responsabilidad de aproximadamente 4,000 agricultores. Siendo Intibucá, Ocotepeque y La Paz los departamentos donde se concentra la mayor producción. Sin embargo, también tenemos una producción de papa en los departamentos de Francisco Morazán y El Paraíso [11]. En 2014 la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), estimó la producción nacional de 609,400 qq y un rendimiento de 226 qq (14.7t/ha) [12].

El monitoreo continuo de las condiciones meteorológicas es clave para desarrollar estrategias de adaptación que contrarresten los efectos del cambio climático [13]. Las estaciones climáticas son vitales en este proceso, ya que permiten medir en tiempo real variables como la temperatura, la precipitación y la humedad, optimizando así la gestión de insumos agrícolas según las condiciones locales [14]. No obstante, en regiones donde la cobertura de estaciones meteorológicas es limitada, los productos satelitales o de reanálisis como ERA5 se han consolidado como una herramienta complementaria esencial. ERA5, desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) y sus derivados, ERA5-Land y ERA5-Ag, ofrecen información sobre las variables meteorológicas, que resulta útil para la simulación de rendimiento, la programación de riego y evaluación de riesgos agroclimáticos [15]. Por ello el análisis de cambios en las variables meteorológicas no solo es crucial para detectar el cambio climático [16], sino también para fortalecer la toma de decisiones en sistemas agrícolas, donde el acceso a datos precisos y actualizados es determinante.

Los modelos de simulación agrícola, como AquaCrop®, son herramientas fundamentales para evaluar los efectos del cambio climático y la variabilidad climática a nivel local en la agricultura. Estos modelos permiten integrar información detallada del cultivo y del entorno, para proporcionar resultados que serían difíciles de obtener por métodos prácticos convencionales [17]. Uno de los principales usos al implementar estos modelos es predecir el rendimiento de los cultivos, ya sean cereales, frutas o tubérculos. Al ser alimentado con datos meteorológicos históricos y proyectados, anticipa la influencia de los factores ambientales en el crecimiento y desarrollo de las plantas, lo cual permite optimizar las estrategias de manejo y producción [17]. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones sirven como base para proponer recomendaciones tanto a productores como a investigadores. En el caso del cultivo de papa en la aldea de Azacualpa, estos hallazgos contribuyen al conocimiento sobre el manejo del cultivo y respaldan la toma de decisiones informadas orientadas a reducir la vulnerabilidad del sector.

En ese contexto, la presente investigación busca evaluar el impacto de la variabilidad y el cambio climáticos en la producción de papa en la aldea Azacualpa en Francisco Morazán, Honduras. A través de: La caracterización de las series meteorológicas históricas pertenecientes a las áreas de producción de papa a partir de datos locales y satelitales; y, la simulación de el impacto de la variabilidad y el cambio climático en el rendimiento de papa en Azacualpa, Francisco Morazán, Honduras.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Zona de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la aldea Azacualpa, ubicada en la montaña de Azacualpa Tegucigalpa a una altitud de 1,600 msnm, del departamento de Francisco Morazán, Honduras. La zona presenta un clima tropical de sabana, donde las temperaturas son moderadas, con una variación de 15°C, a 31°C y una precipitación promedio de 1,500 mm.

B. Caracterización de Datos Meteorológicos

Las variables meteorológicas consideradas en el estudio fueron: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, todas a nivel diario. Estas variables son esenciales no solo por su influencia directa en el crecimiento y desarrollo del cultivo, sino también porque constituyen insumos fundamentales para los modelos de simulación agrícola [18]. El estudio se realizó con base a registros meteorológicos, provenientes de las estaciones de Azacualpa y la Reserva Biológica Uyuca (RBU), así como de los productos de reanálisis ERA5-Land y ERA5-Ag descargados de la plataforma "Climate Engine". Los datos de la estación meteorológica Azacualpa, correspondieron al periodo comprendido entre diciembre de 2020 a diciembre de 2024, mientras que los registros de la estación ubicada en la RBU fueron del 2024. Por su parte los datos de reanálisis abarcaron el periodo 2010-2024.

Se utilizaron ambas estaciones meteorológicas, puesto que, en la RBU y la montaña de Azacualpa se identifican dos zonas de vida predominantes: el bosque húmedo montano bajo subtropical, presente entre los 1,400 y 1,700 msnm, caracterizado por precipitaciones que varían entre los 1,000 y 2,000 mm anuales; y el bosque muy húmedo montano bajo subtropical, que se encuentra entre los 1,700 y 2,000 msnm. Ambas áreas presentan una topografía marcada por mesetas volcánicas y escarpes elevados, formando un relieve típicamente serrano [19].

C. Creación y Procesamiento de base de datos

La precipitación fue analizada en dos periodos: la temporada lluviosa, comprendida entre junio y noviembre, y la temporada seca, de diciembre a mayo. Para el procesamiento de la información, se revisaron y recopilamos manualmente los registros diarios de precipitación de la estación Azacualpa mediante el visor del Sistema de Alerta Temprana del Distrito Central, abarcando el periodo de diciembre del 2020, año en que la estación inició operaciones, hasta diciembre de 2024.

De forma similar, se recopilamos los datos de precipitación de la RBU, combinando los registros de la estación meteorológica con los datos manuales obtenidos de pluviómetros ubicados en la misma zona, con el fin de consolidar una única base de datos de precipitación completa en formato Microsoft Excel®. En contraste, los análisis para la variable de temperatura se realizaron únicamente con datos de la estación de la RBU y los productos satelitales, para el año 2024, debido a la ausencia de registros de temperatura en la estación de Azacualpa.

D. Análisis Estadístico

Para verificar si las variables meteorológicas siguen una distribución normal y seleccionar las técnicas estadísticas adecuadas según la naturaleza de los datos, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (SW) [20]. Para la presente investigación se tiene como hipótesis nula (H_0) que los datos siguen una distribución normal, mientras que la hipótesis alterna (H_1) sugiere que los datos no presentan una distribución normal.

La homogeneidad de las varianzas se evaluó en las series de precipitación y temperatura de las estaciones RBU y Azacualpa, así como de los productos de reanálisis ERA5-Land y ERA5-Ag para validar la consistencia de la variabilidad interanual y espacial, a través de la prueba de Levene [21].

E. Análisis de Correlación

Se emplearon dos tipos de coeficientes de correlación: el coeficiente de Pearson y el coeficiente de Spearman (ρ) para medir el grado de relación entre los datos de las estaciones meteorológicas Azacualpa, RBU y los productos satelitales ERA5-Land y ERA5-Ag. Este análisis tuvo como propósito evaluar la consistencia y fiabilidad de los datos satelitales frente a los registros in situ.

F. Análisis Comparativo

Para la comparación del conjunto de datos se aplicaron la prueba t de "Student" y la prueba de Wilcoxon (W), ambas empleadas para comparar medias y establecer si existen

diferencias estadísticamente significativas entre los registros obtenidos por las estaciones meteorológicas locales y datos satelitales.

G. Modelación del Rendimiento de la Papa

Dentro del módulo de clima se emplearon cinco variables meteorológicas diarias: Temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), precipitación (mm), radiación solar (MJ/m2/día) y viento (km/día). Además, se requirió la concentración media anual de dióxido de carbono (CO₂). Estos archivos fueron importados al programa AquaCrop® para generar el documento climático, obteniendo una serie de datos del 2010 al 2024 para la localidad de Azacualpa.

Para el módulo de cultivo se seleccionó la variedad de papa Paradiso (*Solanum tuberosum* L.), empleada por los productores locales de Azacualpa. Los parámetros fenológicos como: días a emergencia, inicio y fin de desarrollo de dosel, duración de la tuberización y senescencia, se recopilaban a partir de la información proporcionada por las siguientes referencias: [11], [22] y [23]. Cuando los valores específicos no estaban disponibles, se emplearon los valores predeterminados del propio modelo.

Dentro del módulo de manejo de cultivo se evaluaron dos escenarios de manejo hídrico. En la simulación uno, secano. El cultivo dependió exclusivamente de la precipitación; no se aplicaron láminas de riego durante todo el ciclo. En la simulación dos, riego por aspersión. Se programaron aplicaciones de agua para restituir la humedad del suelo al 100% de la capacidad de campo cada vez que el contenido volumétrico descendía al 80% de la disponibilidad total. Además, el modelo se ejecutó bajo un nivel de fertilidad potencial, es decir, se asumió que la disponibilidad de nutrientes no limita el crecimiento ni el rendimiento del cultivo [22, 23]. De este modo, el efecto de la nutrición se mantiene constante, permitiendo evaluar de forma aislada la influencia de la oferta hídrica y de las condiciones ambientales en la productividad del sistema.

H. Escenarios de Cambio Climático

Con el objetivo de evaluar el impacto del cambio climático sobre el rendimiento del cultivo de papa en la localidad de Azacualpa, se aplicaron las deltas resultadas de los escenarios de las Trayectorias de Concentración Representativas, (RCP por sus siglas en inglés), provenientes del IPCC, proyectados para el 2050. Esta metodología consistió en modificar las series climáticas observadas de un periodo base (2010-2024), ajustándolas conformes a las proyecciones del escenario RCP 6.0, representativo de un trayecto de emisiones intermedias.

Los deltas climáticos mensuales utilizados fueron obtenidos del portal web “Agua Honduras”, de la sección “Escenarios de cambio climático”, el cual proporciona datos específicos por microcuencas. Para este estudio, se utilizó la microcuenca correspondiente al código “Choluteca, Grande, 1905018”, que abarca la zona de interés [24].

Durante las simulaciones se evaluó la evolución del rendimiento del cultivo de papa a lo largo de su ciclo fenológico, diferenciado entre condiciones de riego y secano. Se obtuvieron tres variables clave: peso seco, biomasa total acumulada y peso fresco comercial; todas expresadas en toneladas por hectáreas (t/ha), durante un periodo de aproximado de 105 días después de la siembra.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados descriptivos de las variables climáticas

Los resultados obtenidos mediante la prueba de SW indican que los datos de precipitación, tanto en la temporada seca (diciembre a mayo) como en la temporada lluviosa (junio a noviembre), para el periodo evaluado entre diciembre de 2020 y noviembre de 2024, no siguen una distribución normal. Este comportamiento fue observado en las estaciones meteorológicas de la RBU y Azacualpa, así como en los productos de reanálisis ERA5-Land, ERA5-Ag, los cuales presentan valores significativamente bajos del estadístico SW y valores $p < .001$ (Tabla 1).

TABLA I
ANÁLISIS DE NORMALIDAD PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA (MM)

Fuente de datos	Temporada	SW	Valor p
Azacualpa	Diciembre a Mayo	0.09	<.001
Azacualpa	Junio a Noviembre	0.45	<.001
RBU	Diciembre a Mayo	0.29	<.001
RBU	Junio a Noviembre	0.63	<.001
ERA5-Land	Diciembre a Mayo	0.27	<.001
ERA5-Land	Junio a Noviembre	0.57	<.001
ERA5-Ag	Diciembre a Mayo	0.28	<.001
ERA5-Ag	Junio a Noviembre	0.62	<.001

Estos resultados sugieren una alta variabilidad interanual y la posible presencia de valores extremos en los registros de precipitación, lo cual es característico en climas tropicales con eventos intensos pero esporádicos. Este patrón coincide con el estudio correspondiente a la referencia [25], donde se analizó series de precipitación diaria en 3,007 estaciones meteorológicas globales, y se encontró que muchas series no seguían una distribución normal, especialmente en regiones áridas y ecuatoriales, que se atribuyó a la alta asimetría y baja frecuencia de días lluviosos.

Los resultados presentados en la Tabla 2 indican que todas las series de temperatura mínima y máxima correspondientes a ERA5-Land, ERA5-Ag y la estación meteorológica de RBU para el año 2024, presentan valores $p < 0.05$, lo que permite indicar que no siguen una distribución normal, lo cual fue considerado para la elección de pruebas estadísticas posteriores. Por otro lado, la prueba de Levene arrojó valores $p < .001$ tanto para la temperatura mínima como para la temperatura máxima,

lo que indica la no homogeneidad de varianzas entre los conjuntos de datos analizados.

TABLA II				
NORMALIDAD Y HOMOGENEIDAD DE TEMPERATURA MÍNIMA Y MÁXIMA				
Fuente de datos	Temperatura min		Temperatura Max	
	SW	Valor <i>p</i>	SW	Valor <i>p</i>
RBU	0.96	<.001	0.99	0.014
ERA5-Land	0.92	<.001	0.94	<.001
ERA5-Ag	0.88	<.001	0.99	0.011
Prueba de Levene		<.001		<.001

B. Resultados de la caracterización de las series meteorológicas

La Fig. 1 muestra la comparación de la distribución de la precipitación diaria mediante diagramas de caja entre las estaciones meteorológicas de RBU y Azacualpa, y los productos de reanálisis climático ERA5-Land y ERA5-Ag. Durante el periodo comprendido entre diciembre 2023 y mayo 2024, caracterizado por condiciones secas en la región centro-sur de Honduras, se registraron bajos niveles de precipitación diaria en todas las fuentes analizadas. En general, se observó una ligera tendencia al incremento hacia los meses de abril y mayo, que coincide con la transición hacia la estación lluviosa. Se evidencia que los datos de reanálisis, en particular ERA5-Ag tienden a sobreestimar la precipitación respecto a las observaciones locales. Además, los productos satelitales muestran una mayor dispersión y presencia de valores extremos, mientras que los datos registrados por las estaciones presentan valores más consistentes y concentrados, lo que resalta la importancia del uso de información local para representar con mayor precisión la dinámica de la zona. En contraste, los meses de junio 2024 a noviembre 2024 reflejan la temporada de lluvias, con picos máximos de precipitación en junio y septiembre, y una disminución en julio y agosto asociada al periodo de canícula, fenómeno caracterizado por una reducción temporal de lluvias a mitad de la estación húmeda. Aquí también se identificó una mayor dispersión en los datos satelitales, mientras que las estaciones locales presentaron valores más consistentes (Fig. 2).

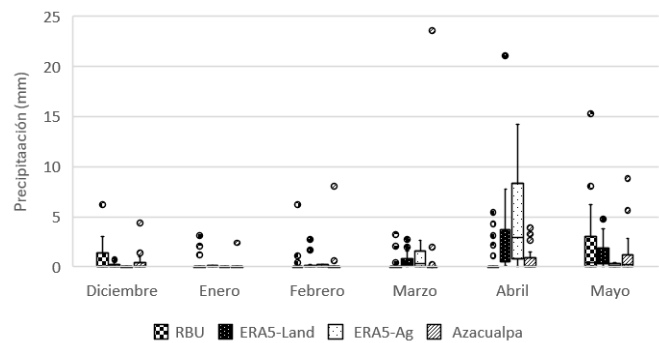


Fig. 1 Comparación de la precipitación diaria (mm) durante la temporada seca (diciembre 2023- mayo 2024) entre las estaciones meteorológicas Azacualpa, RBU y productos de reanálisis climático ERA5-Land y ERA5-Ag

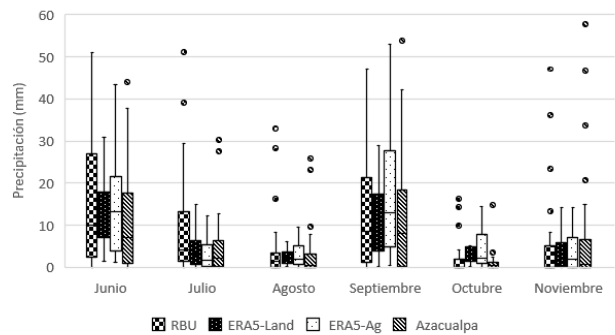


Fig. 2 Comparación de la precipitación diaria (mm) durante la temporada lluviosa (junio 2024- noviembre 2024) entre las estaciones meteorológicas Azacualpa, RBU y productos de reanálisis climático ERA5-Land y ERA5-Ag

Respecto a la temperatura máxima, los resultados mostraron un patrón estacional definido: Las temperaturas más altas se registraron entre marzo y mayo, seguidos de una disminución durante la temporada lluviosa. Los productos de reanálisis tendieron a sobreestimar las temperaturas máximas en comparación con los datos locales en RBU (Fig. 3). Por su parte, la Fig. 4 permite observar que, los datos satelitales ERA5-Land y ERA5-Ag de la misma forma tienden a estar por encima de las temperaturas mínimas registradas localmente en RBU, particularmente en los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre. Los valores medianos de ERA5-Land y ERA5-Ag son consistentemente superiores a los de RBU, reflejando posibles sesgos positivos ya documentados en la literatura, como los encontrados por la referencia [26], quienes señalan que los datos reanalizados tienden a suavizar los extremos térmicos debido a su resolución espacial y a las técnicas de asimilación de datos utilizadas. Además, se destaca que la dispersión (rango intercuartílico) es mayor en los datos satelitales en comparación con la RBU en varios meses, lo que podría asociarse a la variabilidad interna de los modelos frente a las mediciones locales.

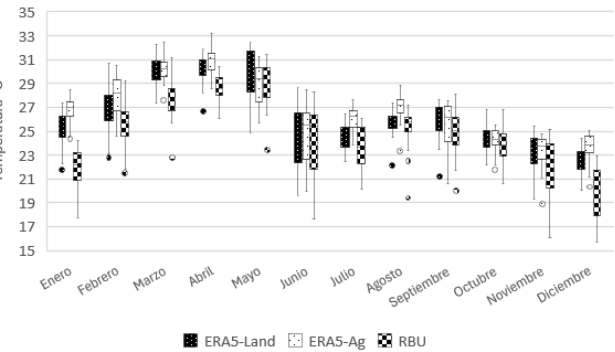


Fig. 3 Comparación de la temperatura máxima (°C) durante el año 2024, entre estaciones meteorológicas y productos de reanálisis climático en Azacualpa

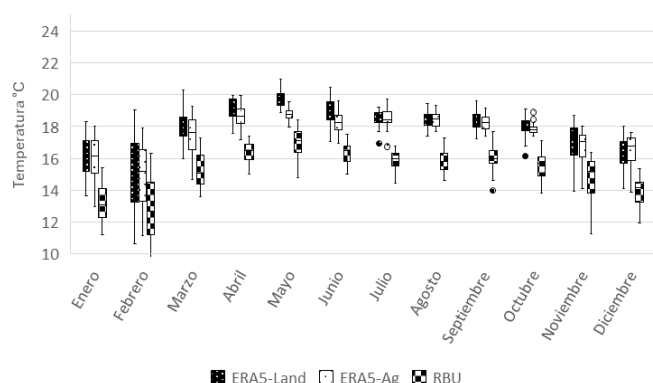


Fig. 4 Comparación de la temperatura mínima (°C) durante el año 2024, entre estaciones meteorológicas y productos de reanálisis climático en Azacualpa

C. Correlaciones entre Estaciones Meteorológicas y Productos Satelitales de Reanálisis

Para el periodo de diciembre de 2020 a mayo 2024, los resultados muestran una correlación moderada entre RBU vs. Azacualpa ($\rho = 0.422$), una correlación baja para ERA5-Land vs. Azacualpa ($\rho = 0.364$), y muy baja y no significativa para ERA5-Ag vs. Azacualpa ($\rho = 0.088$) (Tabla 3). En contraste, en el periodo de junio a noviembre, la correlación se mantuvo moderada entre RBU vs. Azacualpa ($\rho = 0.547$) y ERA5-Land vs. Azacualpa ($\rho = 0.528$), mientras que para ERA5-Ag vs. Azacualpa fue baja ($\rho = 0.301$) (Tabla 4). Estos resultados sugieren que la coherencia espacial de la precipitación entre las diferentes fuentes disminuye durante la época seca, especialmente en los productos satelitales, siendo ERA5-Ag el que muestra menor capacidad para representar la variabilidad registrada en la estación de Azacualpa. Un estudio realizado en España evaluó los productos de reanálisis de ERA5-Land en comparación con datos de estaciones meteorológicas locales, encontrando valores de correlación de “Spearman” entre 0.5 y 0.9, lo que indica una concordancia moderada a alta entre las fuentes de datos. Sin embargo, se observó que la precisión de los productos de reanálisis disminuía en regiones con orografía compleja y durante eventos de precipitación extrema [27].

TABLA III

COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA LA PRECIPITACIÓN ENTRE FUENTES DE DATOS CLIMÁTICOS (DICIEMBRE DE 2023 A MAYO DE 2024)

Par de fuentes analizadas	ρ	Valor p
RBU vs. Azacualpa	0.422	<.001
ERA5-Land vs. Azacualpa	0.364	<.001
ERA5-Ag vs. Azacualpa	0.088	0.079

TABLA IV

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA LA PRECIPITACIÓN ENTRE FUENTES DE DATOS CLIMÁTICOS (JUNIO A NOVIEMBRE DE 2024)

Par de fuentes analizadas	ρ	Valor p
RBU vs. Azacualpa	0.547	<.001
ERA5-Land vs. Azacualpa	0.528	<.001
ERA5-Ag vs. Azacualpa	0.301	<.001

Las correlaciones de “Spearman” para la variable temperatura se analizaron entre la estación meteorológica RBU y los productos de reanálisis, en los siguientes pares de fuentes analizadas: RBU vs. ERA5-Land, RBU vs. ERA5-Ag, así como entre ERA5-Land y ERA5-Ag. Los coeficientes para la temperatura máxima muestran una correlación alta entre RBU vs. ERA5-Land ($\rho = 0.702$), y una correlación muy alta para ERA5-Ag vs. RBU ($\rho = 0.852$) y ERA5-Ag vs. ERA5-Land ($\rho = 0.917$). Estos resultados indican una fuerte concordancia entre los registros de temperatura máxima de las estaciones meteorológicas y los productos de reanálisis (Tabla 5). En cuanto a la temperatura mínima, se observa una correlación alta entre RBU vs. ERA5-Land ($\rho = 0.748$) y entre RBU vs. ERA5-Ag ($\rho = 0.670$), mientras que la correlación entre ERA5-Land vs. ERA5-Ag fue muy alta ($\rho = 0.907$) (Tabla 6). Todos los valores son estadísticamente significativos ($p < .001$), lo que permite rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna, indicando que existe una correlación entre las estaciones RBU y los productos de reanálisis.

TABLA V

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA ENTRE FUENTES DE DATOS CLIMÁTICOS (2024)

Par de fuentes analizadas	ρ	Valor p
RBU vs. ERA5-Land	0.702	<.001
RBU vs. ERA5-Ag	0.852	<.001
ERA5-Land vs. ERA5-Ag	0.917	<.001

TABLA VI

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA TEMPERATURA MÍNIMA ENTRE FUENTES DE DATOS CLIMÁTICOS (2024)

Par de fuentes analizadas	ρ	Valor p
RBU vs. ERA5-Land	0.748	<.001
RBU vs. ERA5-Ag	0.670	<.001
ERA5-Land vs. ERA5-Ag	0.907	<.001

D. Resultados de las pruebas comparativas

El análisis comparativo de la precipitación entre la estación RBU y los productos de reanálisis ERA5-Land y ERA5-Ag evidencian diferencias significativas en todas las combinaciones (Tabla 7). La prueba de SW mostró que los datos no siguen una distribución normal ($p < .001$), por lo que se empleó la prueba no paramétrica de “Wilcoxon” (W) para comprobar la existencia de diferencias. Se detectaron valores $p < .001$ en las comparaciones entre ERA5-Land vs. Azacualpa, así como entre ERA5-Ag vs. Azacualpa, indicando que las series presentan diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, los tamaños del efecto fueron relativamente bajos, lo que sugiere que, aunque las diferencias son estadísticamente relevantes, su magnitud práctica es moderada. De manera destacada, la comparación entre ERA5-Land y ERA5-Ag no fue significativa ($p = 0.63$) y presentó un tamaño de efecto muy pequeño (0.03), lo que indica que los productos satelitales de precipitación son muy similares entre sí, pero difieren con respecto a las observaciones locales.

TABLA VII
PRUEBAS NO PARAMÉTRICA WILCOXON PARA PRECIPITACIÓN

Par de fuentes analizadas	Valor p SW	Wilcoxon	Valor p W	Tamaño del efecto
RBU vs. Azacualpa	<.001	16390	<.001	0.30
ERA5-Land vs. Azacualpa	<.001	27805	<.001	0.30
ERA5-Ag vs. Azacualpa	<.001	29787	<.001	0.30
ERA5-Land vs. ERA5-Ag	<.001	25807	0.638	0.03

En el análisis de temperaturas máxima y mínima (Tabla 8), de acuerdo con la prueba de SW, en algunos casos se cumplió el supuesto de normalidad, mientras que en otros no, por lo que se emplearon tanto la prueba no paramétrica de “Wilcoxon” como la prueba paramétrica t de “Student” según correspondiera. Esta comparación de medias mostró que las diferencias entre RBU vs. ERA5-Land, tanto para temperatura máxima como mínima son estadísticamente significativas ($p < .001$) con un tamaño de efecto alto, lo que indica que, aunque existe correlación medida por el coeficiente de “Spearman”, las magnitudes de temperatura presentan discrepancias relevantes. Similarmente entre ERA5-Land vs. ERA5-Ag también fue significativo ($p < .001$) aunque con un tamaño de efecto moderado (0.5), lo que evidencia una mayor coherencia interna entre los productos de reanálisis, pero aún con diferencias apreciables. Por otro lado, la comparación entre RBU vs. ERA5-Ag evidenció una diferencia significativa ($p < .001$) mediante la prueba t de “Student” con un tamaño de efecto muy alto. Esto resalta que, a pesar de que ERA5-Ag tiende a representar adecuadamente la variabilidad (correlaciones altas de “Spearman”), la magnitud absoluta de los valores sigue presentando diferencias importantes frente a las observaciones reales.

TABLA VIII
PRUEBAS NO PARAMÉTRICA WILCOXON PARA TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA

Par de fuentes analizadas	Valor p SW	Test	Estadística	Valor p W	Tamaño del efecto
RBU vs. ERA5-Land+	<.001	Wilcoxon	64258	<.001	1
RBU vs. ERA5-Ag+	0.202	Student	50.9	<.001	2.6
ERA5-Land vs. ERA5-Ag+	<.001	Wilcoxon	13889	<.001	0.5
RBU vs. ERA5-Land	<.001	Wilcoxon	58810	<.001	0.8
RBU vs. ERA5-Ag	0.262	Student	17200	<.001	0.9
ERA5-Land vs. ERA5-Ag	<.001	Wilcoxon	17244	<.001	0.5

+ Temperaturas máximas

En resumen, la caracterización de las variables climáticas permitió identificar tanto el potencial como las limitaciones de los datos disponibles para alimentar modelos de simulación. Aunque se detectaron diferencias significativas entre las estaciones meteorológicas y los productos de reanálisis, la consistencia en los patrones estacionales permitió su

incorporación al modelo de simulación AquaCrop®, para evaluar el comportamiento del cultivo de papa bajo diferentes condiciones climáticas, de manejo y escenarios futuros de cambio climático.

E. Resultados de la simulación del rendimiento del cultivo de papa en Año Niño, Niña y Neutro

La Fig.5 muestra una marcada influencia de la temporada y del tipo de patrón climático. El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) sobre el rendimiento de la papa bajo condiciones de secano en Azacualpa. Durante la temporada de diciembre a marzo, los rendimientos fueron bajos en todos los escenarios, con valores que no superan las 15 t/ha. Esta reducción puede atribuirse a que esta época coincide con la estación seca en Honduras, lo que limita la disponibilidad de agua y genera un estrés hídrico severo durante las etapas críticas del cultivo, como el desarrollo vegetativo y la tuberización. En contraste, durante las temporadas abril-julio y agosto-noviembre, los rendimientos aumentan significativamente, especialmente bajo condiciones de año Neutras y Niña, con valores cercanos a las 40 t/ha. Esto puede explicarse por la mayor disponibilidad de lluvias, ya que los años Niña están asociados con precipitaciones superiores a lo normal en la región, lo cual favorece el desarrollo del cultivo en ausencia de riego [28]. Sin embargo, incluso estas temporadas, los eventos Niño mostraron un impacto negativo sostenido, reflejando cómo la sequía inducida por este fenómeno reduce el rendimiento agrícola [29].

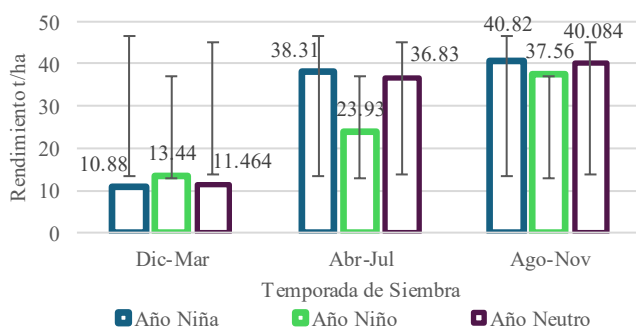


Fig. 5 Rendimiento de papa (t/ha) bajo condiciones secano en años Niño, Niña y Neutro, según tres temporadas de siembra en la aldea Azacualpa, Francisco Morazán

En la Fig. 6, se evidencia una estabilización del rendimiento del cultivo de papa bajo condiciones de riego en la aldea Azacualpa, durante eventos climáticos asociados al fenómeno ENSO. Los rendimientos oscilan entre 35 y 45 t/ha en todas las temporadas de siembra, sin presentar las caídas abruptas observadas en condiciones de secano. Esta estabilidad sugiere que el riego desempeña un papel crucial en la mitigación de los efectos adversos de la variabilidad climática, asegurando un suministro constante de agua durante todo el ciclo. Particularmente, se observa un rendimiento ligeramente superior durante los años Niña, sobre todo en la temporada de agosto-noviembre. Este incremento se atribuye a una sinergia entre el riego y las lluvias adicionales características de estos eventos. No obstante, en eventos Niño, aunque los rendimientos

son algo menores, se mantienen dentro de un rango aceptable, mostrando que el riego puede compensar las deficiencias hídricas asociadas a las sequías inducidas por este fenómeno.

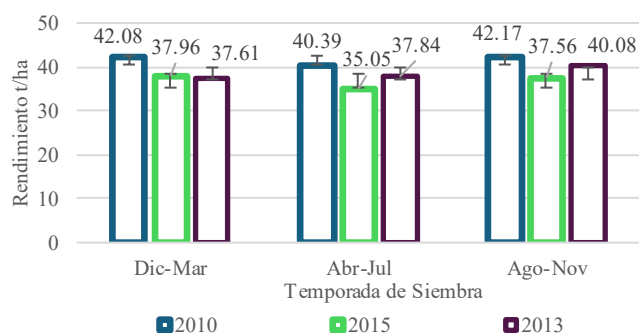


Fig. 6, Rendimiento de papa (t/ha) bajo condiciones de riego en años Niña (2010), Niño (2015) y Neutro (2013), según tres temporadas de siembra en la aldea Azacualpa, Francisco Morazán

Estos hallazgos coinciden con estudios previos que destacan la importancia del riego en la estabilización de los rendimientos agrícolas frente a la variabilidad climática. Por ejemplo, la referencia [30], señala que el manejo eficiente del agua en la agricultura de secano y regadío es una estrategia clave para incrementar la productividad y mitigar los efectos negativos de la variabilidad climática. Así mismo, investigaciones realizadas en Honduras indican que la frecuencia y el tiempo de riego deben adaptarse a las condiciones climáticas y de suelo específicas de cada región para optimizar el rendimiento del cultivo de papa [11].

D. Evolución del rendimiento a lo largo del ciclo del cultivo

En la Fig. 7 se puede apreciar la curva de crecimiento del cultivo de la papa. En el año 2010, bajo condiciones de secano, el rendimiento de papa en peso seco alcanzó 12.359 t/ha, mientras que con riego se elevó significativamente a 42.083 t/ha. Esta diferencia destaca la importancia del riego en la producción de papa. Para el 2050, bajo el escenario climático RCP 6.0, las proyecciones indican un aumento en el rendimiento bajo condiciones de secano a 18.87 t/ha y un rendimiento de 40.521 t/ha con riego. Aunque se observa una mejora en las condiciones de secano, el rendimiento con riego muestra una ligera disminución en comparación a 2010.

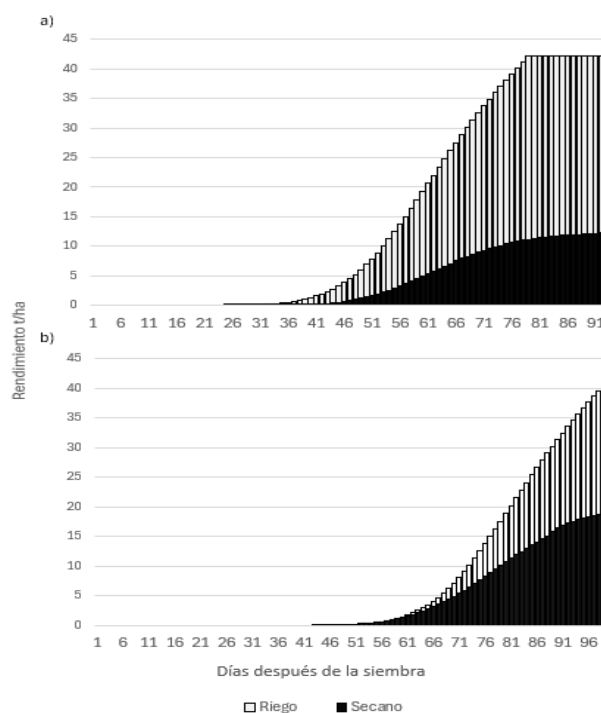


Fig. 7, Evolución del rendimiento de papa en peso fresco en condiciones de secano y riego en año Niña 2010 (a) y 2050 (b)

El aumento en el rendimiento bajo condiciones secano en 2050 podría atribuirse a una mayor disponibilidad de agua debido a cambios en los patrones de precipitación. Sin embargo, la ligera disminución en el rendimiento con riego sugiere que otros factores, como el aumento de las temperaturas, podrían estar afectando negativamente el desarrollo del cultivo.

El cultivo de papa es particularmente sensible a las altas temperaturas, especialmente durante las etapas de tuberización y llenado de tubérculos. Temperaturas elevadas pueden reducir la eficiencia fotosintética y aumentar la tasa de respiración de la planta, lo que disminuye la acumulación de biomasa y, por ende, el rendimiento final. Además, el estrés térmico puede inferir con la formación de tubérculos y acelerar la senescencia de las hojas, acortando el ciclo del cultivo y reduciendo su productividad.

Estos hallazgos coinciden con la referencia [31]. Donde señala el manejo eficiente del agua en la agricultura de secano y regadío es una estrategia clave para incrementar la productividad y mitigar los efectos negativos. Así mismo, la referencia [32] indican que la frecuencia y el tiempo de riego deben adaptarse a las condiciones climáticas y de suelo de cada región para optimizar el rendimiento del cultivo de papa.

En la Fig. 8, se observa la curva de crecimiento bajo condiciones de riego y secano en 2015 y 2050. Para 2015 en condiciones de secano, el rendimiento de papa en peso fresco fue de 13.94 t/ha, mientras que con riego alcanzó 39.58 t/ha. Para el año 2050, las proyecciones indican un rendimiento de 18.37 t/ha en secano y 39.479 t/ha con riego. La comparación entre los años 2015 y 2050 revela que, aunque el rendimiento

en condiciones de secano muestra una mejora en las proyecciones futuras, el rendimiento con riego se mantiene prácticamente constante. Este comportamiento sugiere que el riego sigue siendo una práctica crucial para mitigar los efectos adversos de eventos climáticos como el Niño.

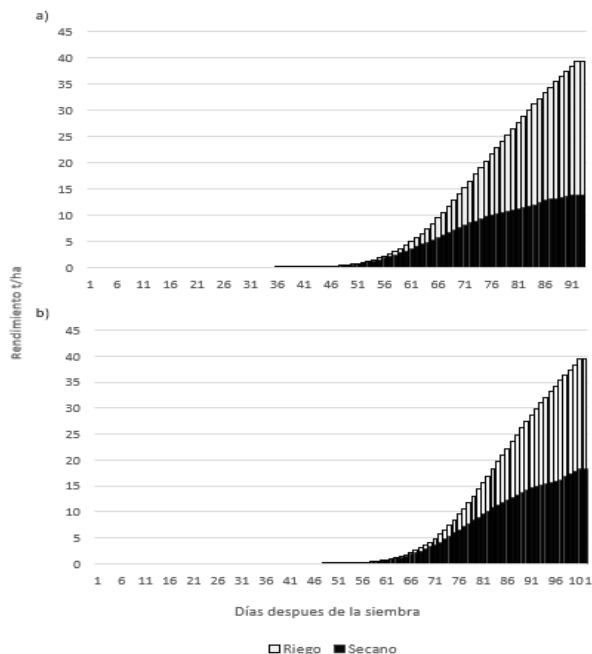


Fig. 8 Evolución del rendimiento de papa en peso fresco en condiciones de secano y riego en año Niño 2015 (a) y 2050 (b)

E. Proyecciones de cambio climático y su impacto en el rendimiento de la papa

En la Fig. 9, muestra la comparación mensual de la precipitación y las temperaturas máximas y mínimas entre el año 2010 y el escenario proyectado para el año 2050. Se observa un incremento generalizado de la temperatura máxima y mínima en todos los meses del año en el escenario futuro. En cuanto a la precipitación, se evidencia una redistribución estacional significativa. En 2050, el mes de mayo concentra un evento extremo, mientras que meses tradicionalmente húmedos como junio y julio muestran una reducción en la disponibilidad hídrica, comparado con 2010.

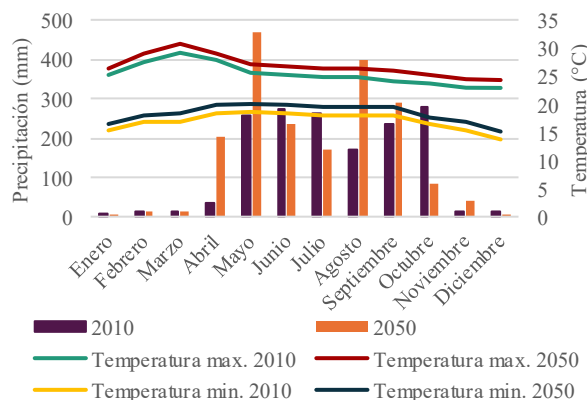


Fig. 9 Comparación mensual de precipitación y temperatura máxima y mínima entre el año 2010 y el escenario climático proyectado para 2050 (RCP 6.2) en Azacualpa

La Fig. 10, refleja las consecuencias directas de estos cambios climáticos sobre el rendimiento del cultivo de papa. Bajo condiciones proyectadas al 2050, se registra una reducción del rendimiento en todas las temporadas de siembra en comparación con el año base 2010. Siendo que, en la temporada de diciembre a marzo, se registran disminución en el rendimiento en un 16.8%. En la temporada de abril a julio se reduce en 10.1% y en agosto a noviembre en un 9.5%.

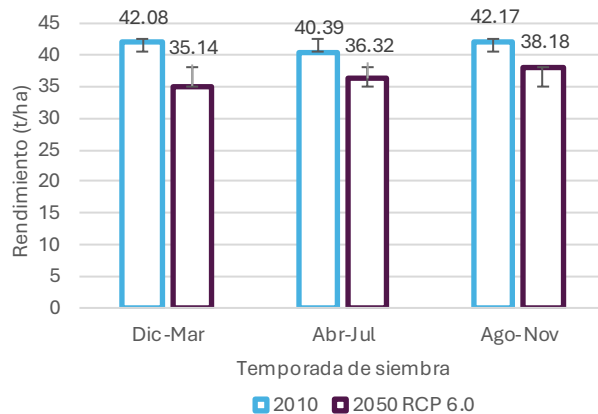


Fig. 10 Comparación del rendimiento de papa (t/ha) bajo condiciones climáticas actuales (2010) y proyectadas para 2050 (RCP 6.0), según temporada de siembra en Azacualpa

La Fig. 11, muestra que, bajo el escenario climático proyectado al 2050, tomando como base un año niño, se espera un aumento sostenido en las temperaturas máximas y mínimas. Esta tendencia, combinada con una distribución más errática de la precipitación, impacta directamente en el cultivo de la papa.

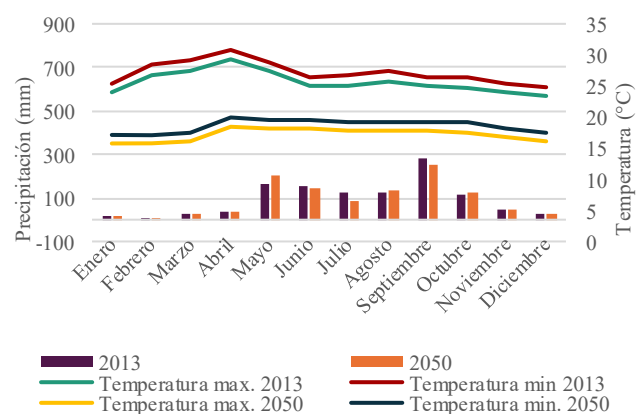


Fig. 11 Comparación mensual de precipitación y temperatura máxima y mínima entre el año 2013 y el escenario climático proyectado para 2050 (RCP 6.2) en Azacualpa

La Fig. 12, confirma esta relación, el rendimiento de papa disminuye en todas las temporadas de siembra en el escenario 2050, respecto a 2013, las pérdidas estimadas son de 1.6% en diciembre a marzo, 4.7% y en agosto a noviembre un 6.2%.

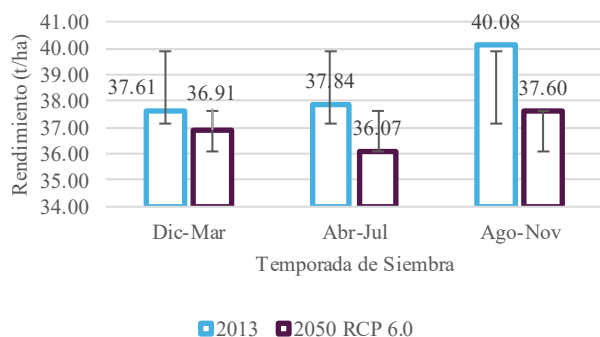


Fig. 12 Comparación del rendimiento de papa (t/ha) bajo condiciones climáticas actuales (2013) y proyectadas para 2050 (RCP 6.0), según temporada de siembra en Azacualpa

La Fig. 13, muestra la comparación mensual de precipitación y temperaturas máximas y mínimas entre el año 2015 y el escenario climático proyectado para el 2050. Se observa una ligera reducción en la precipitación acumulada en varios meses clave del ciclo. Además, las temperaturas proyectadas presentan un aumento sostenido a lo largo del año. Este aumento térmico puede intensificar la evapotranspiración y el estrés hídrico reduciendo la eficiencia durante etapas críticas del cultivo.

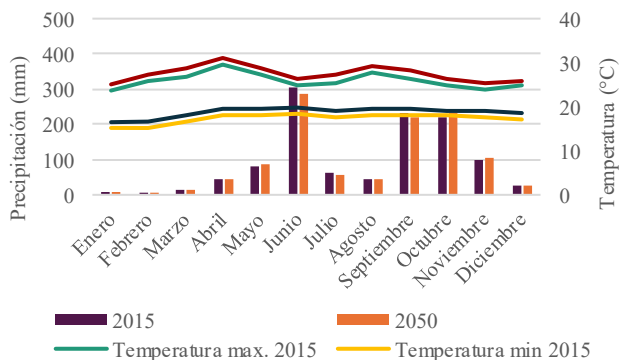


Fig. 13 Comparación mensual de precipitación y temperatura máxima y mínima entre el año 2013 y el escenario climático proyectado para 2050 (RCP 6.2) en Azacualpa

La Fig. 14 compara el rendimiento simulado del cultivo de papa entre el año 2015 y 2050, en diferentes temporadas de siembra. Se evidencia una disminución notable en el rendimiento durante la temporada de agosto a noviembre, pasando de 37.56 t/ha en 2015 a 32.31 t/ha en 2050. Esta caída se relaciona con el aumento de las temperaturas combinado con una disminución de lluvias efectivas en esa época, afectando la disponibilidad hídrica.

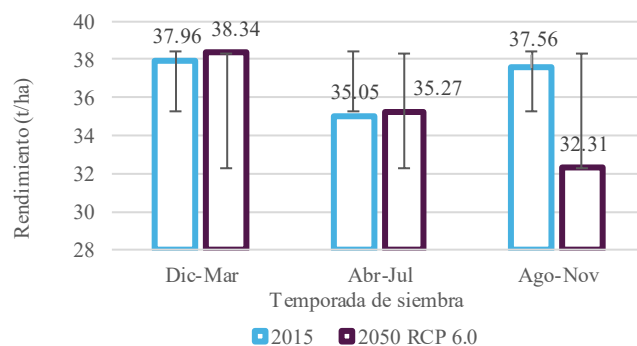


Fig. 14 Comparación del rendimiento de papa (t/ha) bajo condiciones climáticas actuales (2015) y proyectadas para 2050 (RCP 6.0), según temporada de siembra en Azacualpa

En conjunto, los resultados evidencian como la variabilidad climática y los escenarios futuros de cambio climático pueden afectar de gran manera al rendimiento del cultivo de la papa, en Azacualpa, Francisco Morazán, especialmente bajo condiciones de sequo. En los años Niño en temporadas de diciembre a marzo se presentan rendimientos más bajos, sin embargo, el riego permite mantener una producción más estable.

IV. CONCLUSIONES

Las series históricas de Azacualpa muestran que ERA5-Land y ERA5-Ag representan adecuadamente la estacionalidad de precipitación y temperatura, pero difieren de forma estadísticamente significativa en sus magnitudes respecto a las estaciones RBU y Azacualpa, con sobreestimaciones de lluvia, temperaturas extremas y correlaciones moderadas en temporadas secas.

Bajo condiciones de sequo, el rendimiento del cultivo de papa en Azacualpa presenta una disminución de hasta 61.44% en los tres fenómenos climáticos durante la temporada seca, evidenciando la fuerte limitación hídrica en ausencia de riego. En contraste, el riego estabiliza los rendimientos entre 35 y 42 t/ha en todos los años, pero incluso así, durante eventos Niño se observa una disminución promedio de 22.77% en comparación con años Niña y Neutro

Las proyecciones del rendimiento del cultivo de papa bajo el escenario climático RCP 6.0 al 2050 indica una reducción generalizada del 6.12% en comparación con los años base 2010, 2013 y 2015, incluso bajo condiciones de riego.

REFERENCIAS

- [1] B. Kogo, L. Kumar, and R. Koech, "Cambio Climático y variabilidad en Kenia: una revisión de los impactos en la agricultura y la seguridad alimentaria," (in En;en), *Environ Dev Sustain*, vol. 23, pp. 23–43, 2021, doi: 10.1007/s10668-020-00589-1.
- [2] R. J. Hijmans, "Efecto del cambio climático en la producción global de papa," *Am. J. Pot Res*, vol. 80, no. 4, pp. 271–279, 2003, doi: 10.1007/BF02855363.
- [3] G. Malhi, M. Kaur, and P. Kaushik, "Impacto del cambio climático en la agricultura y sus estrategias de mitigación: una revisión.," *Sustainability*, vol. 13, no. 3, p. 1318, 2021, doi: 10.3390/su13031318.

- [4] H. R. Inca Roca, L. Valderrama Vásquez, J. Jiménez Dávalos, P. Zorogastúa Cruz, and R. Pinedo-Taco, "Rendimiento real y simulado con Aquacrop de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), en escenarios de cambio climático en los valles interandinos del Perú," *Idesia*, vol. 41, no. 4, pp. 115–119, 2023, doi: 10.4067/S0718-34292023000400115.
- [5] F. Montoya, D. Camargo, J. F. Ortega, J. I. Córcoles, and A. Domínguez, "Evaluación del modelo AquaCrop para el cultivo de papa bajo diferentes condiciones de riego," *Agricultural Water Management*, vol. 164, pp. 267–280, 2016, doi: 10.1016/j.agwat.2015.10.019.
- [6] H. Wang *et al.*, "Evaluación del desempeño de los modelos AquaCrop y DSSAT-SUBSTOR-Potato en la simulación del crecimiento, rendimiento y productividad del agua de la papa bajo diversos regímenes de fertilización por goteo," *Agricultural Water Management*, vol. 276, p. 108076, 2023, doi: 10.1016/j.agwat.2022.108076.
- [7] A. Sanders, T. S. Thomas, A. R. Rios, and S. Dunston, "Cambio Climático, agricultura y opciones de adaptación par Honduras // Climate change, agriculture, and adaptation options for Honduras," *Sustainability Food Policy*, 2019, doi: 10.2499/p15738coll2.133215.
- [8] H. G. Jansen, J. Pender, A. Damon, and R. Schipper, "Políticas de desarrollo rural y uso sostenible de la tierra en las zonas de ladera de Honduras: un enfoque cuantitativo de los medios de vida // Rural Development Policies and Sustainable Land Use in the Hillside Areas of Honduras: A Quantitative Livelihoods Approach," 2006. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2499/0896291561>
- [9] R. Raymundo *et al.*, "El impacto del cambio climático en la producción mundial de papa // Climate change impact on global potato production," *European Journal of Agronomy*, vol. 100, pp. 87–98, 2018, doi: 10.1016/j.eja.2017.11.008.
- [10] M. Rehman, J. Melgar, C. Rivera, A. M. Idris, and K. J. Brown, "Primer reporte de " Candidatus Liberibacter psyllaeus" o "Ca. Liberibacter solanacearum" asociado con corosisi foiar severa, enrollamiento y necrosis, y decoloración de tubérculos en plantas de papa en Honduras," vol. 94, no. 3, p. 376, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1094/PDIS-94-3-0376C>
- [11] M. Toledo, *El cultivo de papa en Honduras*: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2016. [Online]. Available: <https://repositorio.iica.int/items/2e514b7b-2b66-42ad-b4a7-2f46f8fc44bf>
- [12] Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT). [Online]. Available: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- [13] L. Sánchez and O. Reyes, *Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe*. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/bitstreams/889969d0-e5a0-48cf-a01d-54432324a595/download>
- [14] S. Tenzin, S. Siyang, T. Pobkrut, and T. Kerdcharoen, "Estaciones meteorológicas de bajo coste para una agricultura climáticamente inteligente // Low cost weather station for climate-smart agriculture," pp. 172–177, 2017, doi: 10.1109/KST.2017.7886085.
- [15] K. Soulis *et al.*, "Evaluación de los conjuntos de datos climáticos globales de AgERA5 y MERRA-2 para aplicaciones agrícolas a pequeña escala," *Atmosfera*, vol. 16, no. 3, p. 263, 2025. [Online]. Available: [#">https://www.mdpi.com/2073-4433/16/3/263?utm_source=chatgpt.com#](https://www.mdpi.com/2073-4433/16/3/263?utm_source=chatgpt.com)
- [16] M. Gocic and S. Trajkovic, "Análisis de cambios en variables meteorológicas, mediante pruebas estadísticas de Mann- Kendall y el estimador de pendiente de Sen en Serbia," *Cambio Global y Planetario*, vol. 100, pp. 172–182, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- [17] E. O. Rojas Barbosa, "Evaluación del desarrollo del cultivo de papa abjo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá," Tesis de postgrado, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2011. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8574>
- [18] F. Vanongeval and A. Gobin, "Impactos climáticos adversos en las brechas de rendimiento de trigo, maíz y papa en invierno en el norte de Bélgica," *Agronomy*, vol. 13, no. 4, p. 1104, 2023, doi: 10.3390/agronomy13041104.
- [19] C. R. Ardon Sosa, "Evaluación del enraizamiento de estacas de especies forestales nativas, con potencial para la producción de leña, en zonas altas de Honduras," Proyecto especial de graduación, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras, 1994. [Online]. Available: <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/4992>
- [20] R. R. de Souza, M. Toebe, A. C. Mello, and K. C. Bittencourt, "Tamaño de la muestra y prueba de Shapiro- Wilk: Un análisis del rendimiento del grano de soja. // Sample size and Shapiro-Wilk test: An analysis for soybean grain yield," *European Journal of Agronomy*, vol. 142, p. 126666, 2023, doi: 10.1016/j.eja.2022.126666.
- [21] C. S. Wright, "Test de homogeneidad de varianzas," University of Newcastle, Australia, 2009.
- [22] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá," Colombia, 2013. Accessed: Apr. 30 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/i3428s/i3428s.pdf>
- [23] M. Segura, M. Santos, and C. Núñez, "Desarrollo fenológico de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca)," 2. [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/i3428s/i3428s.pdf>
- [24] C. E. Navarro Racines, F. A. Monserrate Rojas, L. Llanos Herrera, D. Obando Bonilla, and J. Córdoba Sánchez, "Desarrollo de los escenarios climáticos de Honduras y módulo académico de capacitación," Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2018. Accessed: Jan. 4 2025. [Online]. Available: https://aguadehonduras.gob.hn/files/Reporte_Final_Escenarios3cncch_vFinal_1r.pdf
- [25] D. Ruggiu Viola, A. Francesco, D. Ruggiu, F. Viola, and A. Langousis, "Un procedimiento no paramétrico para evaluar la precisión de la Asunción de Normalidad para totales anuales de lluvia, basado en las estadísticas marginales de lluvia diaria: Una aplicación a la base de datos de lluvia NOAA/NCDC. // A Nonparametric Procedure to Assess the Accuracy of the Normality Assumption for Annual Rainfall Totals, Based on the Marginal Statistics of Daily Rainfall: An Application to the NOAA/NCDC Rainfall Database," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 60, no. 4, pp. 595–605, 2021, doi: 10.1175/JAMC-D-20-0060.1.
- [26] M. Tarek, F. P. Brissette, and R. Arsénault, "Evaluación del reanálisis ERA5 como posible conjunto de datos de referencia para la modelización hidrológica en América del Norte," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 24, no. 5, pp. 2527–2544, 2020, doi: 10.5194/hess-24-2527-2020.
- [27] J. Gomis-Cebolla, V. Rattayova, S. Salazar-Galán, and F. Francés, "Evaluación de los conjuntos de datos de precipitación de reanálisis ERA5 y ERA5-Land en España (1951-2020)," *Investigación atmosférica*, vol. 284, p. 106606, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106606>
- [28] W. Anderson, R. Seager, W. Baethgen, and M. Cane, "La variabilidad de la producción agrícola en América del Norte y del Sur se ve impulsada por los ciclos de vida de El Niño y la Oscilación del Sur," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 239, pp. 151–165, 2017, doi: 10.1016/j.agrformet.2017.03.008.
- [29] D. K. Ray, J. S. Gerber, G. K. MacDonald, and P. C. West, "La variación climática explica un tercio de la variabilidad del rendimiento global de los cultivos," *Nature communications*, vol. 6, p. 5989, 2015, doi: 10.1038/ncomms6989.
- [30] S. Pasquale, H. Theodoro, E. Foreres, and R. Dirk, "Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua," Roma, 2012. Accessed: May 18 2025. [Online]. Available: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/82bd842b-862d-4e51-8794-d80156ddab2e/content?utm_source=chatgpt.com
- [31] K. Marius, *Gestión del riesgo climático para la agricultura de pequeña escala en Honduras*. [Online]. Available: <https://www.iisd.org/publications/report/climate-risk-management-smallholder-agriculture-honduras> (accessed: May 19 2025).
- [32] C. G. Diaz-Ambrona, R. Gigena, and C. O. Mendoza, "Climate change impacts on maize and dry bean yields of smallholder farmers in Honduras," *RIED*, vol. 2, no. 1, pp. 4–22, 2013, doi: 10.26754/ojs_ried/ijds.43.