



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

RESEARCH ARTICLE



Impact of climate change on potato yield in the Peruvian Altiplano: An experimental study, with modeling in AquaCrop and generation of scenarios to 2050

Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de papa en el Altiplano Peruano: Un estudio experimental, con modelado en AquaCrop y generación de escenarios al 2050

Wilfredo Julián Yzarra-Tito^{1*} ; Sthefany Tisnado¹ ; Delia Acuña^{1,3} ; Alan Llacza¹ ; Gerardo Jacome¹ ; Bernardino Tapia² 

¹ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, Sede Central, Jesús María, Lima, Perú.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Puno, Perú.

³ Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, Lima, Perú.

* Corresponding author: wyzarra@senamhi.gob.pe (W. J. Yzarra-Tito).

Received: 7 October 2025. Accepted: 26 April 2026. Published: 13 May 2026.

Abstract

Climate change is a critical threat to food security in high Andean regions, where potato (*Solanum tuberosum* L.) is a strategic crop. In the Peruvian Altiplano, projected increases in temperature and decreases in precipitation heighten the vulnerability of rainfed farming systems. In this context, simulation models are essential to anticipate impacts and design adaptation strategies. This study evaluated the effects of climate change on the yield of three potato varieties (Imilla Blanca, Imilla Negra, and Andina) in Taraco and Juliaca, using the AquaCrop model calibrated and validated with experimental field data collected between 2018 and 2021. Trials were conducted under a randomized complete block design, with three sowing dates. Calibration employed phenological, biomass, and yield data, assessed through statistical indicators (r , RMSE, d , and EF), showing robust performance. With the validated model, yield projections were simulated up to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in both rainfed and irrigated conditions. Results indicated significant reductions in Taraco, especially under rainfed conditions and early sowing dates, while in Juliaca yield increases were projected under irrigation, albeit with high variability among models. The Andina variety exhibited greater resilience to water stress, whereas Imilla Negra was the most vulnerable under rainfed conditions. These findings emphasize that irrigation access, the selection of resilient varieties, and adjustments in sowing calendars are key strategies to mitigate impacts and strengthen food security in the Peruvian Altiplano.

Keywords: potato; climate change; AquaCrop; RCP scenarios; adaptation.

Resumen

El cambio climático es una amenaza crítica para la seguridad alimentaria en regiones altoandinas, donde la papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo estratégico. En el Altiplano Peruano, se proyectan aumentos de temperatura y reducciones de precipitación que elevan la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas de secano. En este contexto, los modelos de simulación son esenciales para anticipar impactos y diseñar medidas de adaptación. Este estudio evaluó los efectos del cambio climático sobre el rendimiento de tres variedades de papa (Imilla Blanca, Imilla Negra y Andina) en Taraco y Juliaca, usando el modelo AquaCrop calibrado y validado con datos experimentales entre 2018 y 2021. Los ensayos se realizaron bajo un diseño de bloques completos al azar, con tres fechas de siembra. La calibración empleó información fenológica, biomasa y rendimiento, evaluada mediante indicadores estadísticos (r , RMSE, d y EF), mostrando un ajuste robusto. Con el modelo validado se simuló rendimientos hacia 2050 bajo escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en condiciones de secano y riego. Los resultados mostraron reducciones significativas en Taraco, especialmente en secano y siembras tempranas, mientras que en Juliaca se proyectaron incrementos bajo riego, aunque con alta variabilidad entre modelos. La variedad Andina evidenció mayor resiliencia frente al estrés hídrico, mientras que Imilla Negra fue la más vulnerable en secano. Estos hallazgos destacan que el acceso al riego, la selección de variedades resilientes y el ajuste del calendario de siembra son estrategias clave para mitigar impactos y fortalecer la seguridad alimentaria en el Altiplano peruano.

Palabras clave: papa; cambio climático; AquaCrop; escenarios RCP; adaptación.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.038>

Cite this article:

Yzarra-Tito, W. J., Tisnado, S., Acuña, D., Llacza, A., Jacome, G., & Tapia, B. (2026). Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de papa en el Altiplano Peruano: Un estudio experimental, con modelado en AquaCrop y generación de escenarios al 2050. *Scientia Agropecuaria*, 17(2), 541-556.

1. Introducción

El cambio climático está intensificando los extremos térmicos e hídricos, alterando la disponibilidad de agua y afectando la estabilidad de los ecosistemas y la productividad agrícola a escala global. La evidencia reciente reporta aumentos de temperatura, mayor frecuencia de olas de calor, cambios en la precipitación y mayor recurrencia de sequías e inundaciones, con impactos diferenciados según el cultivo, el territorio y el nivel de calentamiento (Dommo et al., 2025; Deressa et al., 2025; Nazrul et al., 2026). En este escenario, la agricultura constituye uno de los sectores más vulnerables, por lo que resulta clave profundizar en la identificación de umbrales térmicos críticos y su variabilidad espacial para fortalecer las estrategias de adaptación (Tran et al., 2025).

La evidencia reciente muestra que estos impactos no son uniformes, sino que dependen de la interacción entre cultivo, ambiente y nivel de calentamiento. En trigo, se han reportado reducciones del rendimiento asociadas al incremento de extremos climáticos y al estrés térmico e hídrico (Kibebew et al., 2026); en café, se proyectan afectaciones diferenciadas según territorio y fase fenológica, con disminuciones del rendimiento hacia la segunda mitad del siglo (Xiao et al., 2025); en maíz, el aumento de la temperatura y la aceleración fenológica comprometen la productividad bajo escenarios de altas emisiones (Dlamini et al., 2026); en arroz, los cambios en temperatura y precipitación alteran el rendimiento y la estabilidad productiva en sistemas dependientes del clima (Tasneem et al., 2025); y en soya, el cambio climático modifica la respuesta del cultivo en función de la sensibilidad regional y de las condiciones de manejo (Arslan et al., 2026).

En el Altiplano peruano, y particularmente en Puno, esta problemática adquiere especial relevancia debido a la fuerte dependencia de la agricultura de secano y a la creciente irregularidad de las precipitaciones, factores que incrementan la exposición del sistema productivo frente a la variabilidad y al cambio climático. En esta región, las proyecciones climáticas bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 muestran incrementos de temperatura, mayor demanda evaporativa y reducciones en la precipitación, con efectos moderados sobre el rendimiento de los cultivos en el corto plazo y descensos más marcados hacia mediados de siglo (Puma-Cahua et al., 2024). De manera consistente, otros estudios reportan que los impactos del cambio climático en Puno no son homogéneos, sino diferenciados según el escenario de emisión, la localización y el

tipo de amenaza climática considerada (Llacza et al., 2021); mientras que bajo el escenario SSP5-8.5 se proyectan niveles muy altos de multipeligro climático hacia mediados de siglo en algunos sectores de Puno, asociados al incremento de eventos extremos, lo que refuerza la necesidad de generar evidencias para orientar estrategias de adaptación más precisas y efectivas (SENAMHI, 2025).

En este contexto, la papa (*Solanum tuberosum* L.), cultivo central para la seguridad alimentaria y los sistemas agrícolas altoandinos, enfrenta una vulnerabilidad creciente, ya que la variabilidad térmica e hídrica altera su fenología, incrementa el estrés hídrico y reduce su productividad en condiciones de secano (Lozano-Povis et al., 2021; Zevallos et al., 2023; Puma-Cahua et al., 2024). Frente a ello, AquaCrop se ha consolidado como una herramienta robusta para evaluar impactos agroclimáticos y explorar estrategias de adaptación en distintos contextos, incluyendo Europa, Asia y el sur global, con resultados consistentes en cultivos como trigo (Kibebew et al., 2026; Ahmadi et al., 2024), arroz (Phung et al., 2025), algodón (Li et al., 2024) y maíz (Cruz-González et al., 2025; Feng et al., 2025). En el Perú, Puma-Cahua et al. (2024) calibraron AquaCrop para la variedad Imilla Negra y mostraron una reducción proyectada del rendimiento hacia 2050 asociada a la disminución de la precipitación. Sin embargo, persiste una brecha en simulaciones localizadas para zonas estratégicas como Juliaca y Taraco, utilizando datos agroclimáticos regionales y variedades representativas del Altiplano. En este marco, el presente estudio evalúa los efectos del cambio climático sobre el rendimiento de Imilla Blanca, Imilla Negra y Andina mediante AquaCrop calibrado con datos locales y escenarios CMIP5, con el fin de generar evidencia útil para fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas altoandinos.

2. Metodología

2.1. Ubicación del campo experimental

El estudio se desarrolló en dos localidades agroecológicas del departamento de Puno, Perú: Taraco (Huancané), a 74,2 km al norte de Puno (15°17'54" S; 69°48'44" W; 3819 m s.n.m.), y Juliaca (San Román), a 56 km al norte de Puno (15°26'39" S; 70°12'28.2" W; 3826 m s.n.m.) (Figura 1).

2.2. Información edafoclimática

La calibración de AquaCrop se sustentó en datos edáficos obtenidos de calicatas representativas en Juliaca y Taraco, donde se analizaron parámetros hidráulicos como saturación (Sat), capacidad de

campo (FC), punto de marchitez permanente (WP) y conductividad hidráulica saturada (Ksat) (Tabla 1). Paralelamente, se emplearon registros de temperatura máxima y mínima, precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_0) provenientes de estaciones agrometeorológicas del SENAMHI; esta última calculada mediante FAO ETo Calculator v3.2 bajo el método Penman-Monteith. Dichos insumos resultaron esenciales para simular el balance hídrico y la interacción suelo-cultivo-atmósfera en condiciones de secano y bajo escenarios de cambio climático.

2.3. Evaluaciones experimentales

Entre 2018 y 2021 se implementaron ensayos en Taraco y Juliaca bajo un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), con tres fechas de siembra y tres variedades de papa (Imilla Negra, Imilla Blanca y Andina), combinadas con dos niveles de fertilización. El manejo agronómico fue homogéneo (riego por aspersión, sistema de siembra, distancias y área experimental), lo que permitió obtener un conjunto de datos robusto para la calibración y validación de AquaCrop, garantizando comparabilidad entre localidades y campañas y reduciendo la influencia de factores no controlados (Tabla 2).

2.4. Variedades de papa utilizadas en el experimento

El estudio se realizó con tres variedades de papa nativa (*Solanum tuberosum* ssp. andigenum): Imilla Blanca, Imilla Negra y Andina, seleccionadas por su

representatividad en los sistemas agrícolas del Altiplano y su tolerancia a sequías, heladas y granizadas (Arcos & Cahuana, 2002). Estas variedades presentan ciclos fenológicos similares (150 – 160 días), buena aptitud de conservación poscosecha y alta calidad culinaria, aunque difieren en su potencial productivo y características morfo-agronómicas. Imilla Blanca e Imilla Negra destacan por su adaptación a condiciones adversas, mientras que Andina presenta el mayor potencial de rendimiento. En conjunto, estas características respaldan su pertinencia para la calibración y validación de modelos de simulación orientados a evaluar la respuesta de materiales genéticos resilientes frente al estrés climático en el sur del Perú (Arcos & Cahuana, 2002).

2.5. Calibración del modelo AquaCrop

La calibración del modelo AquaCrop se efectuó a partir de datos fenológicos del cultivo, incluyendo emergencia, floración, inicio de formación de tubérculos y maduración fisiológica, complementados con información de manejo agronómico y de riego. Los parámetros se ajustaron manualmente siguiendo un procedimiento iterativo de simulación y validación, con el fin de alinear las proyecciones de cobertura de dosel y biomasa seca acumulada con las observaciones de campo. Este enfoque, basado en Pinheiro et al. (2024) y Adebayo et al. (2024), permitió obtener concordancia estadísticamente aceptable entre datos simulados y observados.

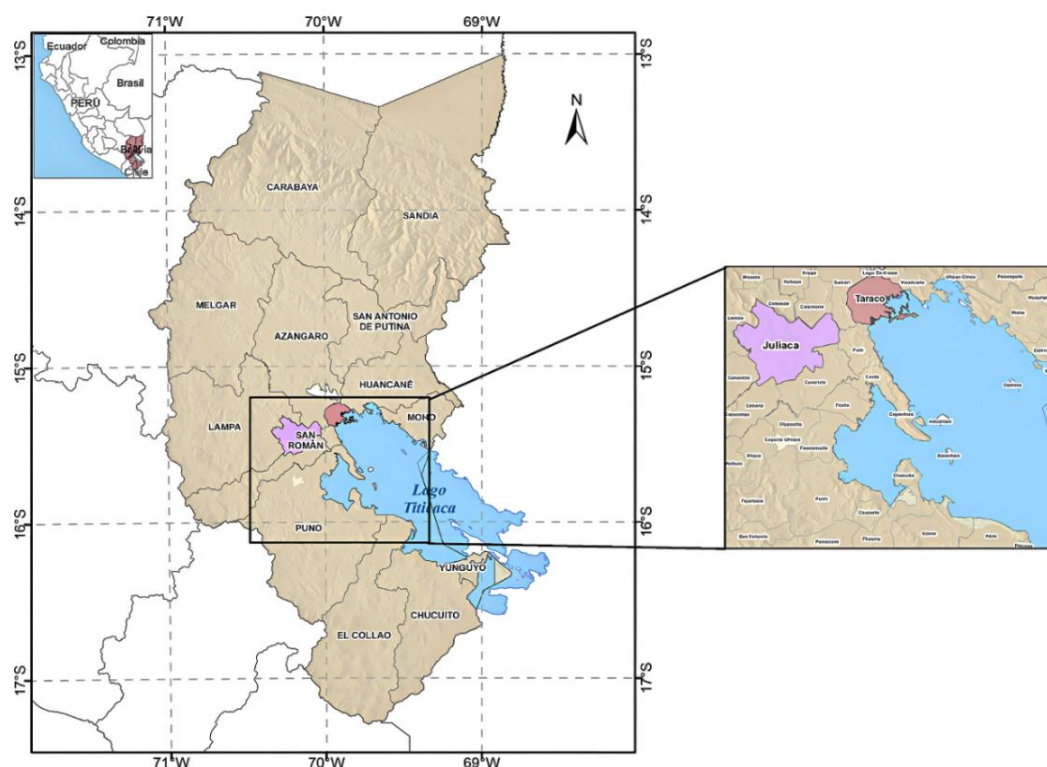


Figura 1. Ubicación de las parcelas experimentales.

Tabla 1
Coeficientes hídricos de suelo en la zona de estudio

Localidad	Profundidad (m)	Sat (% vol.)	FC (% vol.)	WP (% vol)	Ksat (mm/día)	Descripción textural
Juliaca	0,1	46	20,6	12,7	500	Franco
	0,3	46	16,8	9,5	500	Franco
	0,6	41	12,8	7,1	1200	Franco arcilloso
Taraco	0,13	47	18,8	10,2	225	Franco arcillo arenoso
	0,3	41	15,8	8,0	1200	Franco arenoso
	0,3	36	9,9	3,8	3000	Arena
	0,47	36	8,4	2,8	3000	Arena

Tabla 2
Descripción de parcelas experimentales de calibración y validación para el cultivo de papa

Características	Taraco Campaña Agrícola 2018-2019	Juliaca Campaña Agrícola 2019-2020	Juliaca Campaña Agrícola 2020-2021
Fechas de siembra	S1: 25/10/18 S2: 07/11/18 S3: 22/11/18	S1: 24/11/19 S2: 11/11/19 S3: 22/11/19	S1: 20/10/20 S2: 10/11/20 S3: 30/11/20
Variedades		V1: Imilla Negra V2: Imilla Blanca V3: Andina	
Nivel de fertilización (N-P-K)	Variedad Nativa: 120-100-80 Variedad Mejorada: 150-100-80	Variedad Nativa: 120-100-80 Variedad Mejorada: 150-100-80	Variedad Nativa: 120-100-80 Variedad Mejorada: 150-100-80
Densidad/ha	0,80 a 1,0 m x 0,25 a 0,30 m	0,80 a 1,0 m x 0,25 a 0,30 m	0,80 a 1,0 m x 0,25 a 0,30 m
Sistema de siembra	Golpe	Golpe	Golpe
Manejo	Riego complementario	Riego por aspersión	Riego por aspersión
Área total del experimento	1749,6 m ²	1749,6 m ²	1749,6 m ²
Área experimental/variedad	64,8 m ²	64,8 m ²	64,8 m ²
Número de surcos/área experimental	6	6	6
Ancho del surco	7,2 m	7,2 m	7,2 m
Longitud del surco	9 m	9 m	9 m
Distancia entre surco	0,80 m	1 m	1m

La calidad del ajuste se verificó mediante indicadores de desempeño (coeficiente de correlación de Pearson r , raíz del cuadrado medio del error RMSE, índice de concordancia d y eficiencia del modelo EF), aplicando umbrales mínimos ($r \geq 0,65$; $d \geq 0,65$; $EF > 0$), lo que garantiza la robustez del modelo calibrado en condiciones de campo.

2.6. Validación del modelo AquaCrop

La validación del modelo AquaCrop se efectuó mediante la comparación entre datos observados y simulados en cada tratamiento experimental, considerando biomasa, cobertura del dosel y rendimiento. La precisión del ajuste se evaluó con cuatro indicadores estadísticos (r , RMSE, d , EF). Estos parámetros permitieron cuantificar la capacidad predictiva del modelo, adoptando como criterios de aceptación valores de r próximos a ± 1 , $RMSE < 20\%$, $d > 0,65$ y $EF > 0$, en concordancia con estándares reportados en estudios recientes (Birhan et al., 2025). Los resultados confirmaron la solidez del modelo para reproducir adecuadamente las dinámicas del cultivo bajo condiciones experimentales de campo.

Coeficiente de correlación de Pearson (r):

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \tag{1}$$

Cuadrado Medio del Error (RMSE):

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{M} \tag{2}$$

Índice de concordancia (d)

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \right] \tag{3}$$

Eficiencia del modelo (EF)

$$EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - M)^2} \right] \tag{4}$$

“ P_i ” es la observación simulada, “ O_i ” es la observación medida, $P_i = P_i - M$ y $O_i = O_i - M$, siendo “ M ” la media de la variable observada.

2.7. Generación de escenarios climáticos al 2050

Se ha aplicado la técnica de reducción de escala dinámica con el modelo regional Weather Research and Forecasting con núcleo dinámico Advanced Research (WRF-ARW) versión 3,8,1 (Skamarock et al., 2021) para obtener los escenarios climáticos al 2050 bajo la Trayectoria de Concentración Representativa de alta emisión de gases de efecto invernadero (RCP8.5). La configuración del modelo fue

de 35 niveles desde superficie hasta 5 hPa. Los dominios de simulación fueron de 50 km para Sudamérica y 12 km Perú. El procesamiento de las simulaciones climáticas (1981 - 2065) fueron realizadas en SENAMHI-Perú (Figura 2). En el posproceso, la precipitación y temperatura fueron llevadas a una resolución espacial de 10 km utilizando datos grillados PISCO (Aybar et al., 2019, Huerta et al., 2023) y mediante técnicas de interpolación geostatística a 5 km. Otra técnica utilizada fue la reducción de escala estadística de la precipitación y temperatura para el escenario RCP4.5. Se evaluaron los métodos GLM-C15PC, GLM-C15PC-2NN, GLM-1NN y AN1-C5PC, resultando el más óptimo el GLM-15PC-2NN (Generalized Linear Models con 15 componentes principales). En la calibración (1981-2005) se usaron datos de reanálisis y observados. Los predictores para precipitación fueron T2M (Temperatura a 2 metros), Z250 (Geopotencial a 250 hPa), U250 (Viento zonal a 250 hPa) y Q500 (Humedad específica a 500 hPa), mientras que para las temperaturas T2M, T500 (Temperatura a 500 hPa) y Z500 (Geopotencial a 500 hPa). Los predictandos fueron la precipitación y temperatura observada y los datos grillados PISCO.

2.8. Generación de rendimientos futuros para el cultivo de papa al 2050.

Tras la calibración y validación del modelo AquaCrop para las variedades Imilla Blanca, Imilla Negra y Andina, se estimaron los rendimientos futuros de papa bajo escenarios climáticos proyectados al 2050. Se emplearon tres Modelos de Circulación General (ACCESS1-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR) y un promedio Multimodelo, considerando las trayectorias de emisiones RCP4.5 y RCP8.5. Las simulaciones se realizaron en condiciones de secano y riego para las localidades

de Taraco y Juliaca, evaluando dos horizontes futuros: cercano (2006 – 2035) y medio (2036 – 2065), en comparación con el periodo histórico de referencia (1981 – 2005) (Puma-Cahua et al., 2024). La variación porcentual del rendimiento estimado bajo clima futuro respecto al histórico se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\%Rdto_{MCG} = \left(\frac{Rdto_{MCG} - Rdto_{1981-2005}}{Rdto_{1981-2005}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde $\Delta\%Rdto_{MCG}$: Variación porcentual del rendimiento bajo un MCG y escenario dado; $Rdto_{MCG}$: Rendimiento simulado con los modelos climáticos (RCP4.5/RCP8.5); $Rdto_{1981-2005}$: Rendimiento simulado histórico para Juliaca y Taraco.

Para evaluar la significancia del cambio, se comparó $\Delta\%Rdto_{MCG}$ con la desviación estándar histórica (σ), usando los siguientes criterios:

$\Delta\%Rdto_{MCG} < \sigma$	Cambio no significativo (n.s)
$\sigma < \Delta\%Rdto_{MCG} < 2\sigma$	Cambio significativo (*)
$\Delta\%Rdto_{MCG} > 2\sigma$	Cambio muy significativo (**)

3. Resultados y discusión

3.1 Calibración del modelo AquaCrop

La calibración de AquaCrop para Imilla Blanca, Imilla Negra y Andina mostró alta consistencia con estudios recientes en papa bajo diversos ambientes. Los parámetros ajustados (Tabla 3) validaron la representación de los requerimientos térmicos, la dinámica del dosel y la eficiencia en el uso del agua en condiciones altoandinas. Andina destacó por su precocidad, mayor índice de cosecha y eficiencia en la interceptación temprana de radiación, en concordancia con lo reportado por Misgina et al. (2024) sobre la ventaja adaptativa de variedades de ciclo corto. En contraste, Imilla Blanca e Imilla Negra presentaron mayores requerimientos térmicos y sensibilidad al estrés hídrico, resultados coincidentes con las simulaciones de Puma-Cahua et al. (2024) en el Altiplano peruano.

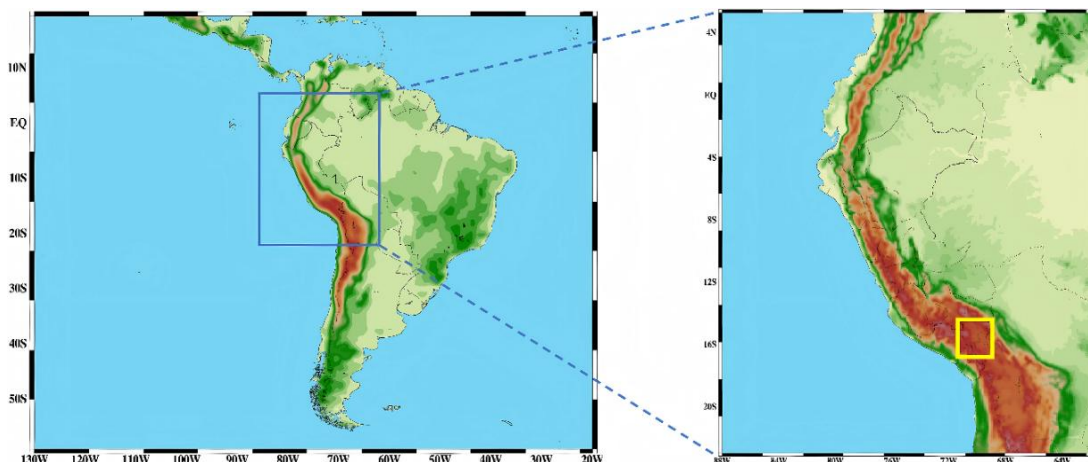


Figura 2. Reducción de escala dinámica con WRF-ARW V3.8.1, Sudamérica a 50 km y Perú a 12 km de resolución espacial horizontal.

Tabla 3
Parámetros de calibración para tres variedades de papa en el Altiplano Peruano

Parámetros de calibración	Valores Calibrados		
	Imilla Negra	Imilla Blanca	Andina
Fenología del cultivo			
Días del calendario: de la siembra a la emergencia.	28	27	28
Días calendario: desde la siembra hasta la máxima profundidad de enraizamiento.	87	84	89
Días de calendario: desde la siembra hasta la senescencia.	121	123	107
Días calendario: desde la siembra hasta la madurez (duración del ciclo de cultivo)	153	156	143
Días de calendario: desde la siembra hasta la floración.	100	99	89
GDDays: de la siembra a la emergencia	252	242	198
GDDays: desde la siembra hasta la máxima profundidad de enraizamiento.	786	767	627
GDDays: desde la siembra hasta la senescencia.	1092	1118	750
GDDays: desde la siembra hasta la madurez (duración del ciclo de cultivo)	1360	1391	985
GDDays: desde la siembra hasta el inicio de la formación del tubérculo	901	905	622
Crecimiento y desarrollo del cultivo			
Temperatura base (° C) por debajo de la cual el desarrollo del cultivo no progresa	2	2	4
Temperatura superior (° C) por encima de la cual el desarrollo del cultivo ya no aumenta con un aumento de la temperatura	28	28	28
Coefficiente de cultivo cuando el dosel está completo, pero antes de la senescencia (KcTr, x)	1,1	1,1	1,1
Profundidad de enraizamiento mínima efectiva (m)	0,3	0,3	0,3
Profundidad máxima de enraizamiento efectiva (m)	0,8	0,8	0,8
Efecto de la cubierta del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa final de la temporada	60	60	60
Tamaño del dosel de la planta individual (recrecimiento) al 1er día (cm ²)	5	5	5
Número de plantas por hectárea	42000	42000	40000
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC): Aumento de la cobertura del dosel (fracción del suelo cubierta por día)	0,12	0,14	0,20
Cobertura máxima del dosel (CCx) en la fracción del suelo	0,8	0,8	0,8
Coefficiente de disminución del dosel (CDC): Disminución en la cobertura del dosel (en fracción por día)	0,078	0,079	0,1
Productividad del agua normalizada para ETo y CO2 (WP *) (gramo / m ²)	17	17	17
Productividad del agua normalizada para ETo y CO2 durante la formación del rendimiento (como% WP *)	100	100	100
Formación del rendimiento			
Construcción del Índice de Cosecha a partir de la floración (días)	48	51	47
Índice de Cosecha de Referencia (HIo) (%)	63	64	75
Posible aumento (%) de HI debido al estrés hídrico antes del inicio de la formación de rendimiento	10	10	10
Coefficiente que describe el impacto positivo en el HI del crecimiento vegetativo restringido durante la formación del rendimiento	10	10	10
Coefficiente que describe el impacto negativo en el HI del cierre estomático durante la formación del rendimiento	8	8	8
Aumento máximo permitido (%) del HI especificado	15	15	15
GDDays: aumento del Índice de Cosecha durante la formación del rendimiento	418	437	323

El umbral térmico superior calibrado (28 °C) se alineó con lo reportado por Wang et al. (2023) en China y Misgina et al. (2024) en Etiopía, confirmando la validez global de este límite fisiológico. De igual forma, la productividad del agua (WP*) calibrada en 17 g/m² coincidió con los valores señalados por dichos autores, garantizando una adecuada representación de la relación agua-biomasa. En conjunto, estos resultados confirman que AquaCrop, con ajustes locales, constituye una herramienta robusta para simular la respuesta de la papa en el Altiplano Peruano.

3.2 Validación del modelo AquaCrop

Los resultados mostraron un alto nivel de desempeño. Para cobertura foliar, los valores de r oscilaron entre 0,867 y 0,962, mientras que para biomasa alcanzaron hasta 0,997, lo que evidencia una correlación muy fuerte entre simulaciones y observaciones. El RMSE relativo se mantuvo ≤ 25%, dentro de los rangos

aceptados en simulaciones de campo, siendo comparable con lo reportado por Misgina et al. (2024) en sistemas semiáridos. El índice de concordancia presentó valores superiores a 0,95 en la mayoría de los casos y alcanzó valores de d = 1,000 en Juliaca (2019 – 2020), lo que refleja una coincidencia casi perfecta entre las series. Los valores de EF variaron entre 0,789 y 1,000, con desempeños particularmente altos en biomasa (EF > 0,98 en varias combinaciones), confirmando la capacidad del modelo para explicar gran parte de la variabilidad observada. Al analizar por variedades, Imilla Negra mostró los mejores ajustes en Juliaca tanto para cobertura como para biomasa, mientras que Andina presentó mayor variabilidad interanual, posiblemente vinculada a su ciclo corto y a la mayor sensibilidad térmica en fases iniciales. En términos ecofisiológicos, el mayor ajuste en biomasa se explica por ser una variable acumulada en el tiempo, menos sensible a errores puntuales, mientras

que la cobertura depende de procesos de expansión y senescencia foliar altamente influenciados por la temperatura y la disponibilidad hídrica instantánea (Tabla 4). Estos resultados confirman que AquaCrop reproduce de manera robusta el crecimiento y productividad de papa en ambientes altoandinos, validando la parametrización desarrollada. Además, concuerdan con lo observado por Wang et al. (2023) y Puma-Cahua et al. (2024), quienes también reportaron mayor fidelidad en la simulación de biomasa frente a la arquitectura foliar. La consistencia de estos hallazgos respalda el uso de AquaCrop como herramienta confiable para la predicción de rendimientos, evaluación de estrategias de manejo hídrico y proyección de impactos del cambio climático en la región andina.

3.3 Escenarios de cambio climático en el Altiplano Peruano

En Juliaca, la temperatura máxima promedio anual presenta una tendencia aparente de aumento en el período 1981 - 2005 (Figura 3). Las proyecciones bajo un escenario de alta (moderada) emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5 (RCP4.5) mantienen un aumento sostenido de la temperatura máxima, con cambios de 1,6 °C (0,9 °C) para el período promedio 2006 - 2035 y de 3,6 °C (1,9 °C) para 2036 - 2065, cuando es comparada con el período de referencia 1981 - 2005, (Tabla 5). Con respecto a la temperatura mínima promedio anual observada, presenta variabilidad con una tendencia de aumento en el periodo de 1981 - 2005, para después presentar disminución hasta 2009 y después recuperarse (Figura 3).

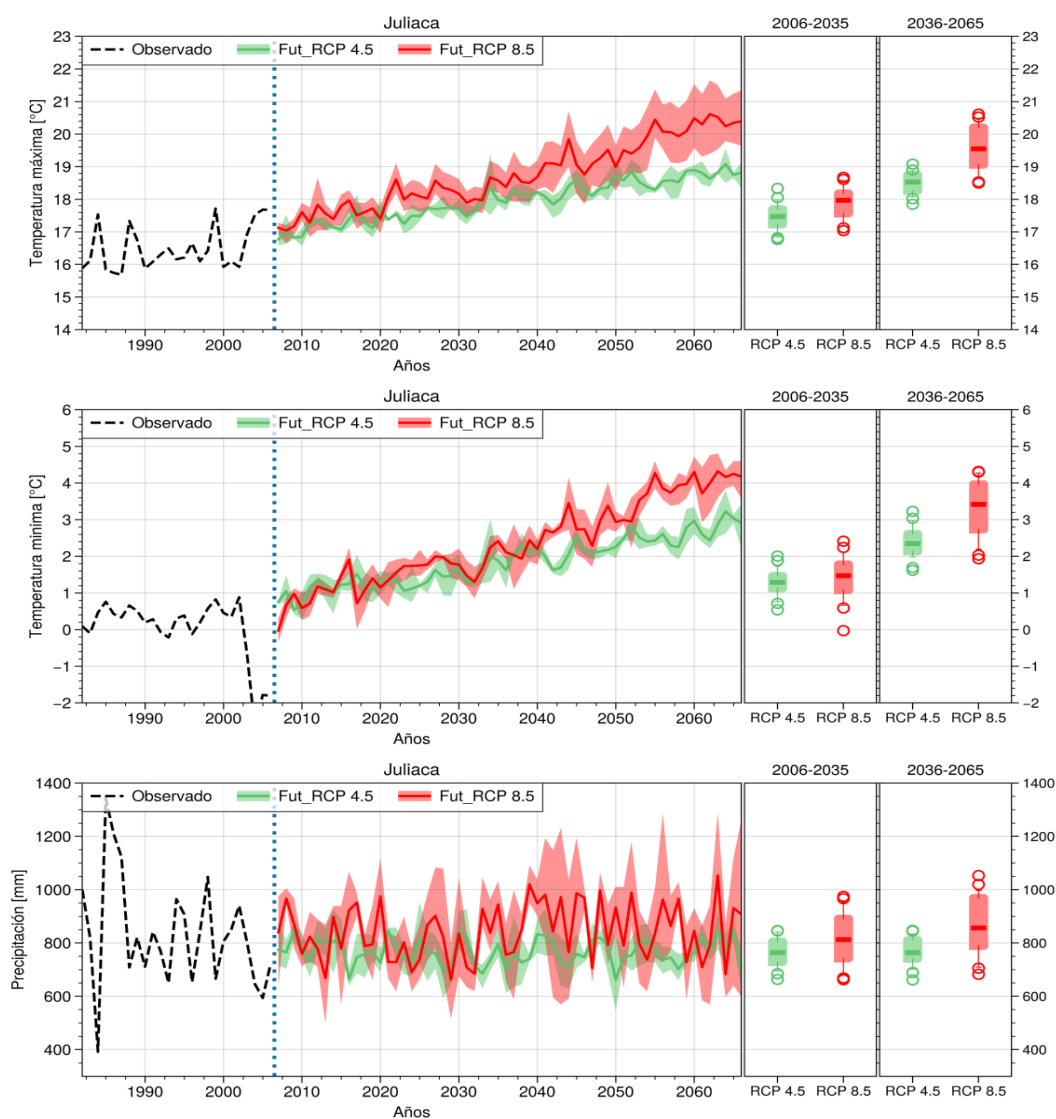


Figura 3. Proyecciones de temperatura máxima, mínima y precipitación anual en Juliaca para el periodo 2005 - 2065, considerando el escenario RCP8.5 (modelos de reducción dinámica, línea roja) y el escenario RCP4.5 (modelos de reducción estadística, línea verde). Se incluyen la serie observada para el periodo 1981 - 2005 (línea negra continua). Las líneas roja y verde continuas representan el promedio de las proyecciones durante 2005 - 2065.

Tabla 4

Indicadores estadísticos de eficiencia en la validación promedio cuando se compara los valores observados y simulados del rendimiento (t/ha) con la cobertura del dosel (%) y Biomasa (t/ha)

Localidad	Variedad	Rendimiento (t/ha)		Cobertura (%)				Biomasa (t/ha)			
		Simulado	Observado	RMSE	EF	d	r	RMSE	EF	d	r
Taraco	Imilla Negra	6,3	5,9	15,8	0,9	0,98	0,96	16,71	0,95	0,99	0,99
	Imilla Blanca	6,2	5,9	17,4	0,88	0,97	0,95	17,73	0,95	0,99	0,98
	Andina	6,9	6,6	17,2	0,89	0,97	0,95	15,9	0,97	0,99	0,99
Juliaca	Imilla Negra	7,7	6,3	17,7	0,88	0,97	0,95	22,89	0,88	0,97	0,96
	Imilla Blanca	7,5	6,8	16,5	0,9	0,98	0,94	21,68	0,93	0,98	0,98
	Andina	9,2	7,9	17,3	0,89	0,98	0,95	23,67	0,91	0,98	0,96

Tabla 5

Proyecciones de cambio en temperatura máxima, mínima y precipitación anual en Juliaca y Taraco para los periodos 2006 – 2035 y 2036 – 2065, respecto del periodo 1981 – 2005, según los escenarios RCP8.5 y RCP4.5 y modelos ACCESS1-0, HadGEM-ES, MPI-ESM-LR y Multimodelo

Localidad	Periodo	Variable	Valor Promedio/Cambio promedio Δ	ACCESS1-0 (RCP8.5 / RCP4.5)	HadGEM-ES (RCP8.5 / RCP4.5)	MPI-ESM-LR (RCP8.5 / RCP4.5)	Multimodelo (RCP8.5 / RCP4.5)
Juliaca	2006 – 2035	Tmáx °C	18,1 / 1,6	1,5 / 1,0	1,7 / 0,9	1,3 / 0,9	2,0 / 0,9
			17,4 / 0,9				
	2036 – 2065	Tmáx °C	20,1 / 3,6	3,5 / 2,0	3,8 / 2,0	2,6 / 1,8	4,5 / 1,9
			18,5 / 1,9				
	2006 – 2035	Tmín °C	0,74 / 1,5	1,4 / 1,0	1,7 / 0,8	1,4 / 1,5	1,6 / 0,9
			1,38 / 0,9				
2036 – 2065	Tmín °C	2,9 / 3,5	3,6 / 2,0	3,8 / 2,0	3,1 / 2,0	3,7 / 2,0	
		2,4 / 2,0					
2006 – 2035	Prec. mm	767,1 / 1,1	2,3 / -8,3	1,7 / -1,0	-0,6 / -10,6	1,0 / -8,8	
		697,3 / -7,2					
2036 – 2065	Prec. mm	767,7 / 1,2	1,3 / -20,8	4,7 / 20,9	-2,3 / -2,7	1,0 / 0,9	
		754,3 / -0,6					
Taraco	2006 – 2035	Tmáx °C	17,7 / 1,6	1,5 / 1,1	1,5 / 1,0	1,3 / 1,0	2,0 / 1,0
			16,5 / 1,0				
	2036 – 2065	Tmáx °C	19,7 / 3,7	3,6 / 2,2	3,7 / 2,2	2,8 / 2,0	4,7 / 2,1
			17,7 / 2,1				
	2006 – 2035	Tmín °C	1,45 / 1,6	1,5 / 0,9	1,7 / 0,7	0,9 / 0,9	1,1 / 0,8
			1,97 / 0,8				
2036 – 2065	Tmín °C	3,7 / 3,7	3,7 / 1,8	4,1 / 1,9	3,2 / 1,9	3,9 / 1,9	
		2,9 / 1,9					
2006 – 2035	Prec. mm	516,1 / 0,8	1,7 / -5,7	1,0 / -8,0	-0,4 / -5,7	0,6 / -9,0	
		605,4 / -7,1					
2036 – 2065	Prec. mm	516,8 / 0,9	-0,3 / 6,4	3,7 / 49,7	-0,6 / 18,7	0,8 / 26,8	
		641,8 / -1,4					

Las proyecciones bajo un escenario de alta (moderada) emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5 (RCP4.5) indican un aumento sostenido de la temperatura mínima con cambios de 1,5 °C (0,9 °C) para el promedio del periodo 2006 - 2035 y de 3,5 °C (2,0 °C) para el periodo 2036 - 2065, relativo al periodo de referencia 1981 - 2005 (Tabla 5). La precipitación promedio anual observada en la localidad de Juliaca, muestra una tendencia aparente de disminución en el periodo 1981 - 2010 (Figura 3). Las proyecciones de precipitación bajo un escenario de alta (moderada) emisión de gases de efecto invernadero RCP 8.5 (RCP4.5) indican un comportamiento cercano a su variabilidad normal de 1% (-7,2%), para el promedio del periodo 2006 - 2035 y de 1,2% (0,6%) para el periodo 2036 - 2065, cuando es comparado con el periodo de referencia 1981 – 2005 (Tabla 5).

En la localidad de Taraco, ubicada al noreste de la localidad de Juliaca, se observa similar comportamiento de la temperatura máxima, mínima y precipitación con ligera variación de la magnitud (Figura 4) y de los cambios proyectados (Tabla 5), en los promedios de los periodos 2006 - 2035 y 2036 -2065. Siendo, estas proyecciones consistentes con lo encontrado a nivel regional para el sistema hídrico del Lago Titicaca, río Desaguadero, Lago Poopó y Salar de Coipasa (TDPS, 2021). En tanto, la temperatura mínima anual observada en Taraco en el periodo 1981 - 2005 (Figura 4), presenta una tendencia aparente de disminución, a diferencia de Juliaca. Sin embargo, a nivel regional TDPS (2021), encontró una tendencia aumento del orden de 0,01 °C por década, pero sin significancia estadística.

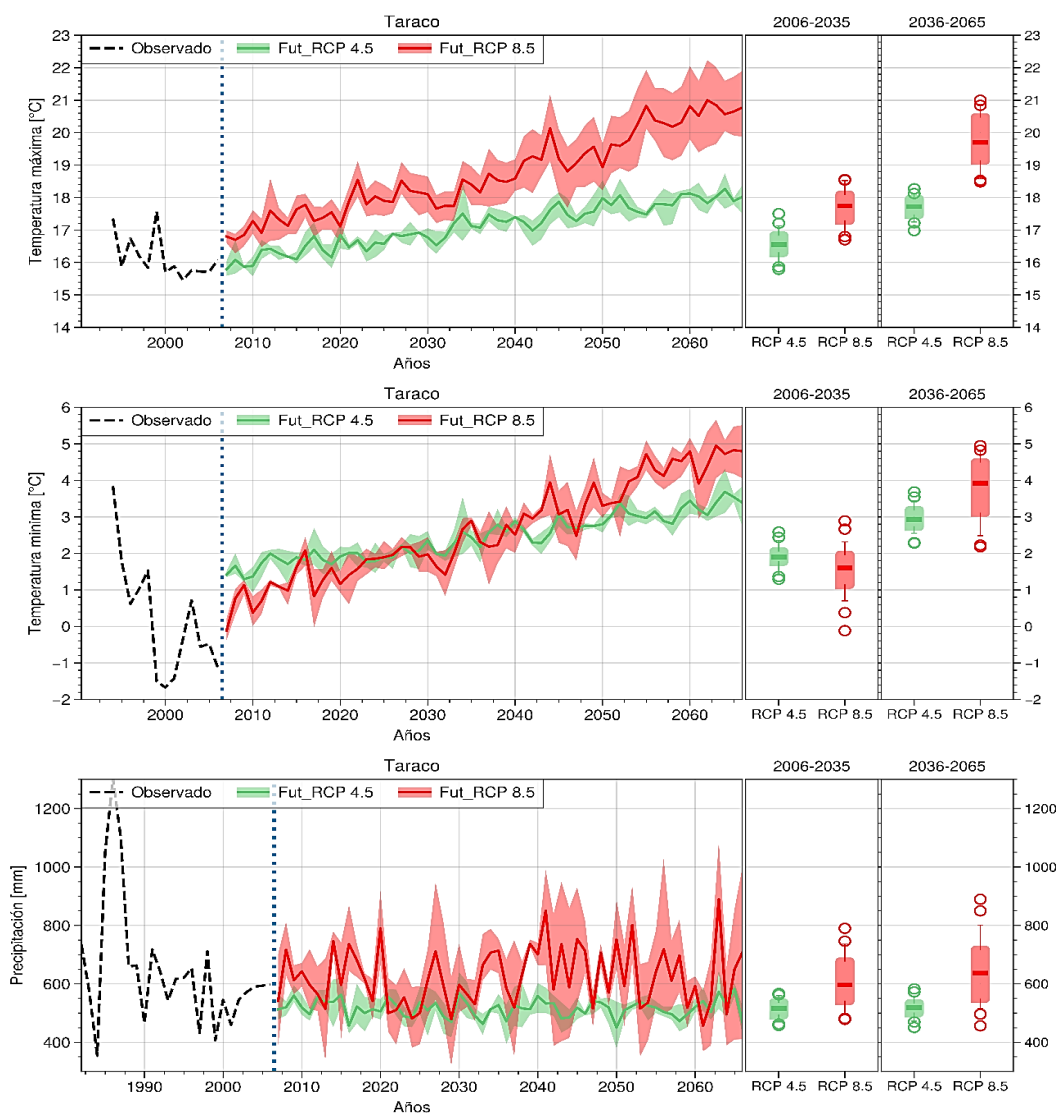


Figura 4. Proyecciones de temperatura máxima, mínima y precipitación anual en Taraco para el periodo 2005-2065, considerando el escenario RCP8.5 (modelos de reducción dinámica, línea roja) y el escenario RCP4.5 (modelos de reducción estadística, línea verde). Se incluyen la serie observada para el periodo 1981-2005 (línea negra discontinua). Las líneas roja y verde continuas representan el promedio de las proyecciones durante 2005-2065.

3.4 Impactos del cambio climático en el cultivo de papa

Las proyecciones climáticas para Juliaca y Taraco indican incrementos de hasta +3,7 °C en la temperatura máxima y mínima y reducciones de hasta -7% en la precipitación anual hacia mediados del siglo XXI, comprometiendo la productividad agrícola en sistemas de secano. Estos cambios acortan el ciclo fenológico de la papa y reducen significativamente los rendimientos, con mayor impacto en variedades sensibles al estrés térmico e hídrico como Imilla Negra (Zevallos et al., 2023; Lozano-Povis et al., 2021; Lakatos et al., 2023).

Los resultados de simulaciones realizadas en ambas localidades muestran impactos diferenciados. En Juliaca, bajo condiciones de riego, los rendimientos

podrían incrementarse entre un 30% - 40% en el futuro medio bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, particularmente en la variedad Andina, que exhibe un alto grado de resiliencia (Figura 7). En contraste, la Imilla Negra en secano se proyecta con caídas por debajo de 3 t/ha en escenarios extremos. En Taraco, las reducciones proyectadas son más severas, alcanzando hasta un 60% en variedades como Imilla Blanca e Imilla Negra bajo secano; no obstante, la variedad Andina bajo riego podría incluso mantener incrementos de hasta 40% en algunos modelos (Figura 8). Este patrón coincide con estudios regionales que identifican el acceso al agua y la eficiencia en el manejo hídrico como factores críticos para sostener la productividad agrícola frente al cambio climático (Puma-Cahua et al., 2024).

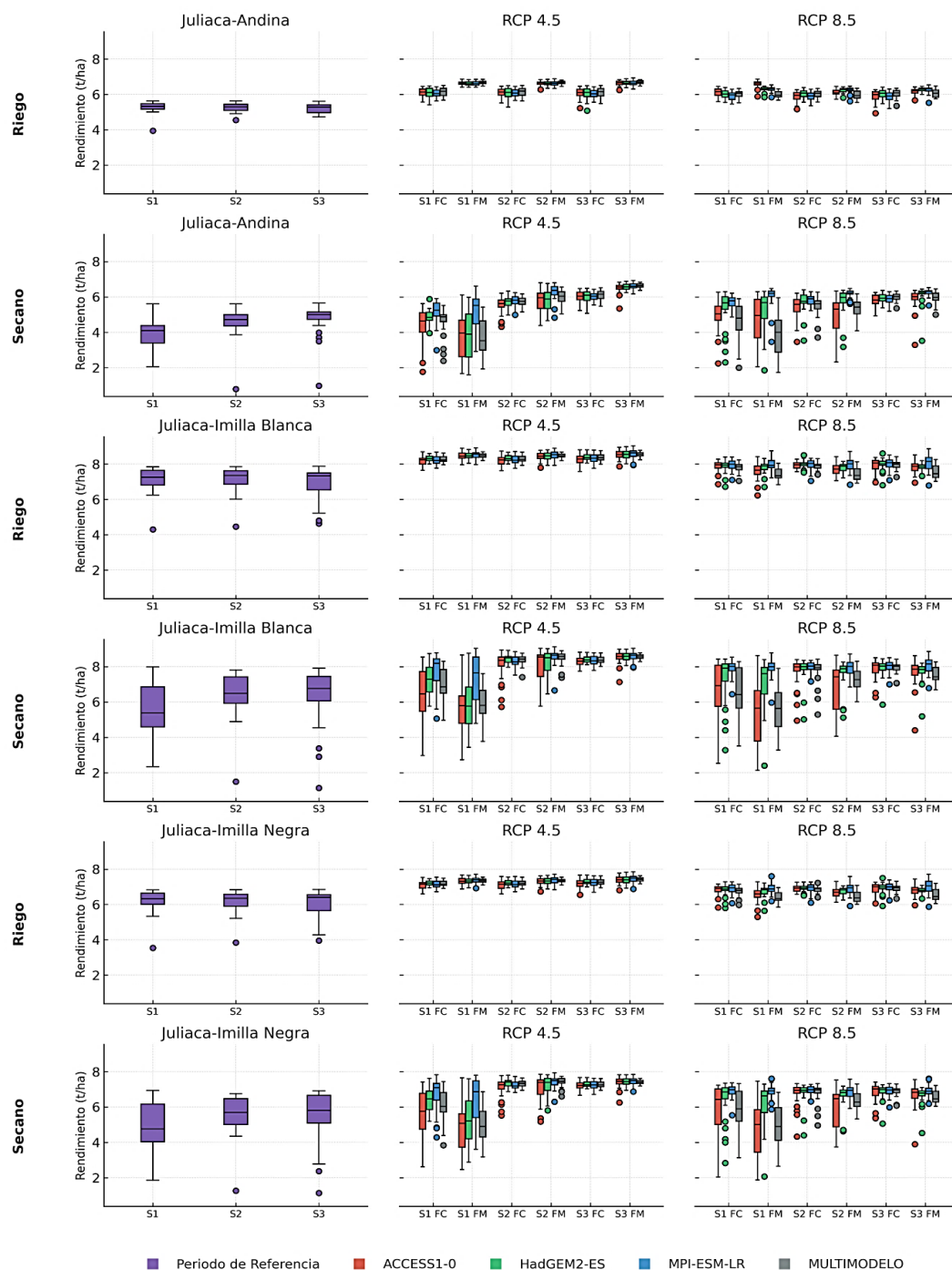


Figura 5. Simulación de rendimientos del cultivo de papa (Andina, Imilla Blanca, Imilla Negra) para tres épocas de siembra (S1: 15/10, S2: 15/11, S3: 05/12); usando los Modelos de Circulación General: ACCESS1-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y Multimodelo (MMD) para el futuro cercano (FC 2006-2035) y futuro medio (FM 2036-2065) y escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5; con respecto al rendimiento de referencia 1981-2005, en la localidad de Juliaca.

La época de siembra también emerge como un factor determinante de adaptación. Las siembras tempranas (mediados de octubre) presentan mayor vulnerabilidad a condiciones climáticas adversas, mientras que las siembras tardías (inicios de diciembre) logran mejores rendimientos relativos, especialmente bajo riego (Figura 5 y Figura 6). Este

hallazgo refuerza la necesidad de ajustar los calendarios agrícolas como medida de resiliencia, en concordancia con revisiones recientes que destacan el papel de la innovación en prácticas culturales frente a escenarios de mayor variabilidad climática (Southern et al., 2025; Lakatos et al., 2023).

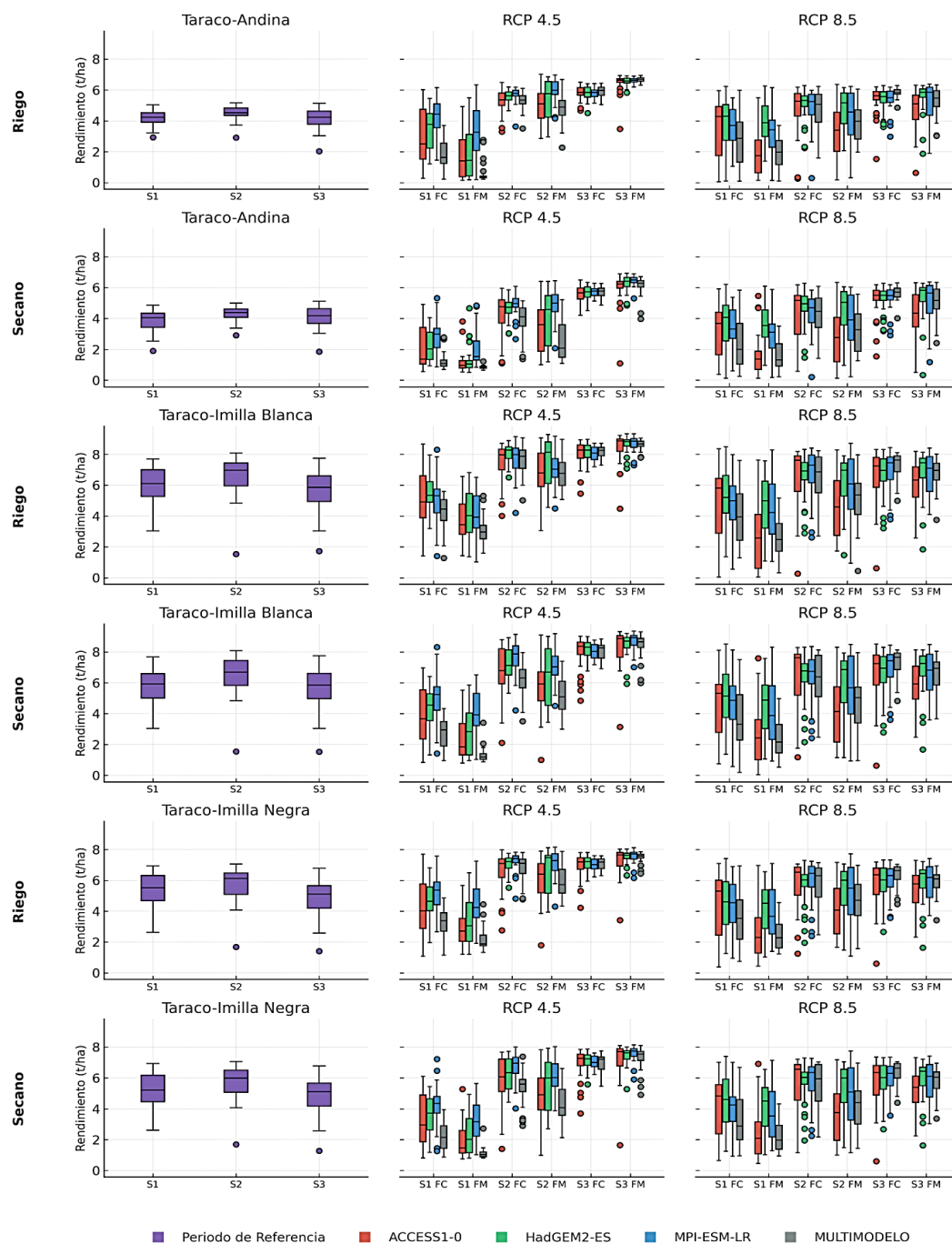


Figura 6. Simulación de rendimientos del cultivo de papa (Andina, Imilla Blanca, Imilla Negra) para tres épocas de siembra (S1: 15/10, S2: 15/11, S3: 05/12); usando los Modelos de Circulación General: ACCESS1-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y Multimodelo (MMD) para el futuro cercano (FC 2006-2035) y futuro medio (FM 2036-2065) y escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5; con respecto al rendimiento de referencia 1981-2005, en la localidad de Taraco.

La variedad Andina se perfila como la más resistente, con rendimientos estables y crecientes en condiciones de riego incluso en escenarios extremos. La Imilla Blanca muestra un comportamiento intermedio, mientras que la Imilla Negra aparece como la más vulnerable en sistemas de secano (Figura 5 y Figura 6). Estudios recientes han resaltado la importancia de identificar y conservar

accesiones locales resistentes a sequía y a heladas, así como de fortalecer sistemas comunitarios de semillas nativas, como los implementados en el Parque de la Papa en Cusco, que salvaguardan tanto la diversidad genética como el conocimiento tradicional asociado (Gastelo et al., 2025; Zevallos et al., 2023; Visscher et al., 2024).

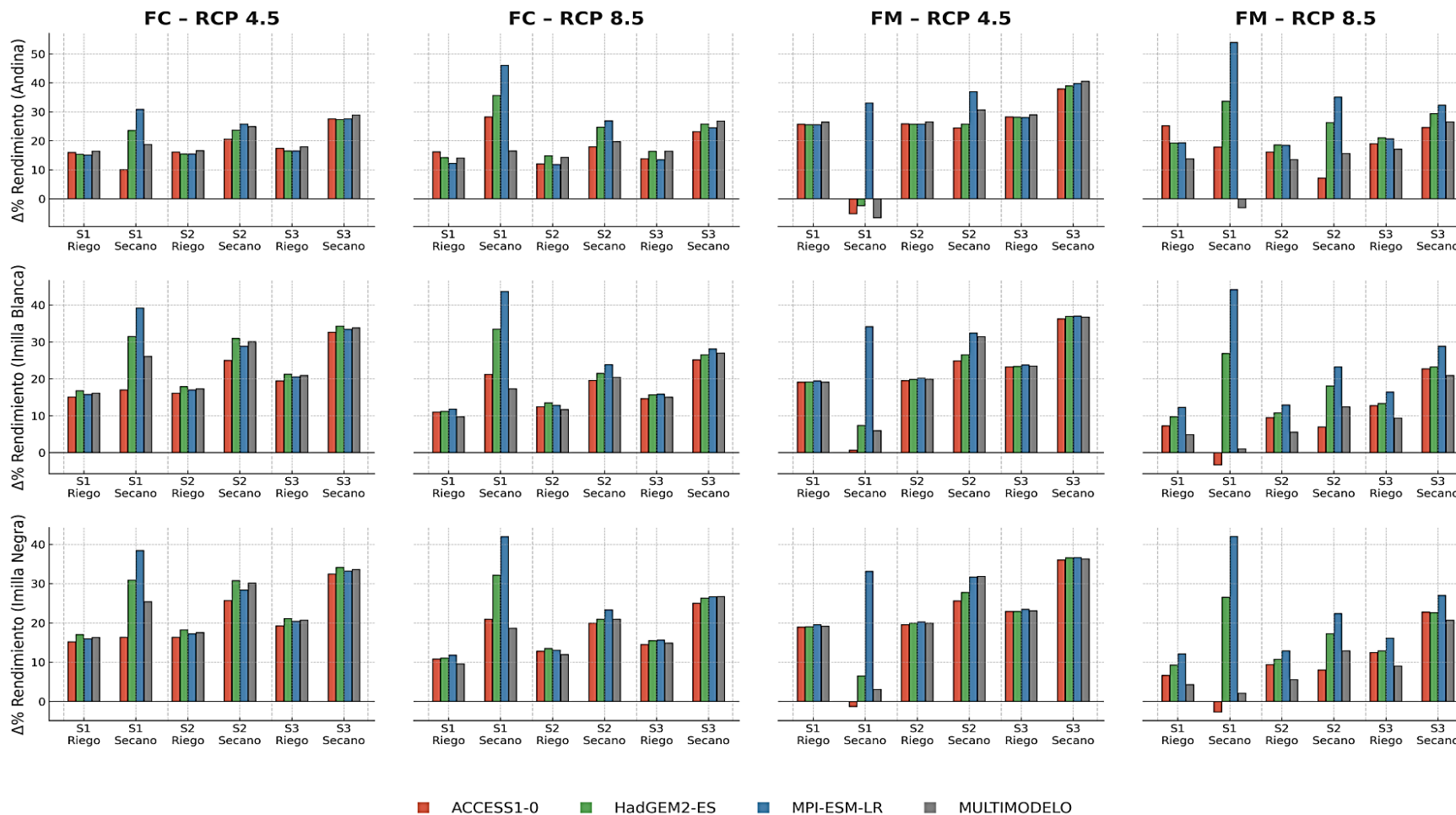


Figura 7. Variación porcentual de los rendimientos del cultivo de papa (Andina, Imilla Blanca, Imilla Negra) para tres épocas de siembra (S1: 15/10, S2: 15/11, S3: 05/12); usando los Modelos de Circulación General: ACCESS1-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y Multimodelo (MMD) para el futuro cercano (FC 2006-2035) y futuro medio (FM 2036-2065) y escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5; con respecto al rendimiento de referencia 1981-2005, en la localidad de Juliaca.

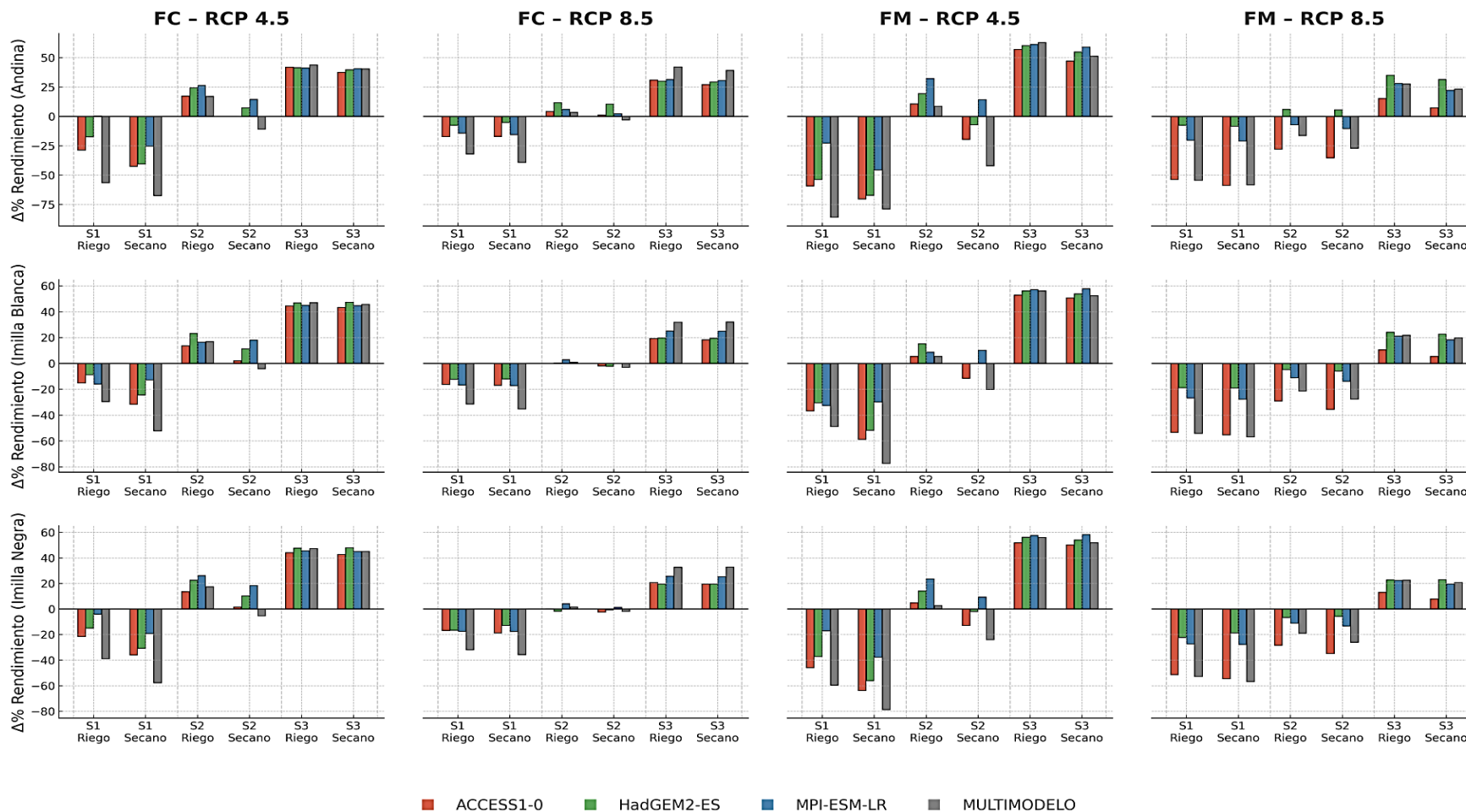


Figura 8. Variación porcentual de los rendimientos del cultivo de papa (Andina, Imilla Blanca, Imilla Negra) para tres épocas de siembra (S1: 15/10, S2: 15/11, S3: 05/12); usando los Modelos de Circulación General: ACCESS1-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y Multimodelo (MMD) para el futuro cercano (FC 2006-2035) y futuro medio (FM 2036-2065) y escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5; con respecto al rendimiento de referencia 1981-2005, en la localidad de Taraco.

Esta convergencia entre proyecciones científicas y percepciones campesinas evidencia la necesidad de políticas públicas participativas que integren la ciencia climática con el conocimiento local. En este sentido, la gestión sostenible de suelos, la expansión planificada del riego, la innovación en el manejo de nutrientes y la diversificación varietal constituyen pilares fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria en la región (Poma-Chamana et al., 2025; Visscher et al., 2024; Lozano-Povis et al., 2021)

En síntesis, el cambio climático podría reducir hasta en un 60% los rendimientos de papa en sistemas de secano del Altiplano peruano hacia 2065 bajo escenarios extremos (Figura 8). Sin embargo, la combinación de variedades resilientes, el acceso a riego, el manejo sostenible de suelos y la adaptación del calendario agrícola permitirían mitigar estos impactos. Estas medidas no solo responden a la urgencia climática, sino que también contribuyen a fortalecer la resiliencia de las comunidades altoandinas y a sostener la producción de uno de los cultivos más emblemáticos y esenciales para la seguridad alimentaria mundial (Lakatos et al., 2023).

4. Conclusiones

Los resultados evidencian que el cambio climático generará impactos diferenciados sobre el rendimiento del cultivo de papa en el Altiplano peruano, en función de la localidad, la variedad, el régimen hídrico y la época de siembra. En Taraco, las proyecciones bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 muestran reducciones significativas del rendimiento hacia mediados de siglo, particularmente en condiciones de secano y siembras tempranas, donde las precipitaciones podrían disminuir hasta en 50% bajo el escenario más pesimista, lo que confirma la alta sensibilidad del cultivo al déficit hídrico y la necesidad de fortalecer estrategias de manejo sostenible del agua. En Juliaca, los rendimientos podrían incrementarse bajo condiciones de riego, aunque se mantiene una elevada incertidumbre asociada a la variabilidad entre modelos climáticos, especialmente bajo RCP8.5. Asimismo, las siembras tardías, realizadas a inicios de diciembre, mostraron un desempeño comparativamente más favorable, configurándose como una alternativa potencial de adaptación frente a la variabilidad climática. La respuesta varietal evidencia que Andina presenta mayor resiliencia frente al estrés térmico e hídrico, con rendimientos estables e incluso superiores bajo riego, mientras que Imilla Negra de secano e Imilla Blanca exhibió un comportamiento intermedio.

Estos hallazgos confirman que el acceso al riego, la selección de variedades resilientes y el ajuste de calendarios de siembra constituyen medidas estratégicas para mitigar los impactos proyectados del cambio climático sobre la papa en Puno. Estos resultados ofrecen evidencia científica para sustentar políticas públicas orientadas a la seguridad alimentaria, la gestión sostenible de recursos hídricos y la conservación de la agrobiodiversidad andina, en concordancia con las estrategias de adaptación climática a nivel regional y global. Asimismo, este estudio proporciona una base útil para orientar a agricultores, extensionistas y tomadores de decisión en la planificación de respuestas adaptativas frente al cambio climático en regiones altoandinas vulnerables. No obstante, los resultados también ponen de relieve la necesidad de desarrollar investigaciones futuras que integren simulaciones biofísicas con evaluaciones socioeconómicas a nivel espacial, a fin de construir escenarios más integrales que consideren no solo la productividad del cultivo, sino también la viabilidad económica y social de las medidas de adaptación en las comunidades campesinas del Altiplano.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, en particular a la Dirección de Agrometeorología, por el soporte técnico y la provisión de información para el desarrollo del estudio.

Contribución de los autores

W. J. Yzarra-Tito: administración de proyectos, conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, validación, escritura-borrador. **S. Y. Tisnado-Yunga:** metodología, investigación. **D. Acuña-Azarte:** metodología, investigación, escritura-revisión y edición. **A. Llacsa-Rodríguez:** metodología, investigación. **G. C. Jacome-Vergaray:** metodología, investigación. **B. Tapia Aguilar:** supervisión, validación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés que pudiera influir en el trabajo presentado en este artículo.

ORCID

W. J. Yzarra-Tito  <https://orcid.org/0000-0002-7357-5943>
 S. Y. Tisnado-Yunga  <https://orcid.org/0009-0004-2364-6274>
 D. Acuña-Azarte  <https://orcid.org/0009-0001-6465-4172>
 A. Llacsa-Rodríguez  <https://orcid.org/0000-0002-4707-8636>
 G. C. Jacome-Vergaray  <https://orcid.org/0000-0002-2499-1967>
 B. Tapia Aguilar  <https://orcid.org/0000-0001-9996-7219>

Referencias bibliográficas

- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adeboye, A. P., Chukalla, A., & Shittu, K. A. (2024). Assessment of the AquaCrop model to simulate the impact of soil fertility management on evapotranspiration, yield, and water productivity of maize (*Zea mays* L.) in the sub-humid agro-ecology of Nigeria. *Discover Agriculture*, 2(1), Article 28. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00030-5>
- Ahmadi, M., Etedali, H., Salem, A., Al-Mukhtar, M., & Elbeltagi, A. (2024). Simulation of wheat water footprint using AquaCrop model under the climate change, case study in Qazvin plain.

- Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02305-0>
- Arcos, J., & Cahuana, R. (2002). Variedades nativas y mejoradas de papa en Puno. Instituto Nacional de Investigación Agraria – INIA.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Birhan, T., Beyene, T., Alemu, G., & Reta, B. (2025). Evaluation of the AquaCrop Model for Simulating Yield and Water Productivity of Maize (*Zea mays* L.) in Semi-Arid Ethiopia. *Irrigation and Drainage*, 74, 2241-2256. <https://doi.org/10.1002/ird.70019>
- Cruz-González, A., Arteaga-Ramírez, R., Monterroso-Rivas, A. I., Soria-Ruiz, J., Sánchez-Cohen, I., & Rojas-López, A. (2025). Assessment of the Effect of Climate Change on the Productivity of Rainfed Maize (*Zea mays* L.) Using Crop Growth Model AquaCrop in Central Mexico. *Water*, 17(13), 1867. <https://doi.org/10.3390/w17131867>
- Deressa, T. C., Chalchissa, F. B., & Gemedo, D. O. (2025). Rainfall and temperature variability and trend in the Horro Guduru Wallaga Zone, Northwestern Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(7), 759. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14195-z>
- Dommo, A., Leasor, Z., Lupo, A., Hunt, S., & Aloysius, N. (2025). Assessment of Anticipated Changes in Extreme Temperature and Precipitation Under 1.5 °C and 2 °C Warming Over the Mississippi River Basin. *International Journal of Climatology*, 45(15), e70135. <https://doi.org/10.1002/joc.70135>
- Dlamini, L., Crespo, O., van Dam, J., Gaso, D. V., & de Wit, A. (2026). Climate change impacts on rainfed maize production of small-scale cropping systems in Eastern Cape, South Africa. *Agricultural Systems*, 233, 104627. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2025.104627>
- Feng, Z., Miao, Q., Shi, H., Gonçalves, J., Li, X., Feng, W., Yan, J., Yu, D., & Yan, Y. (2025). AquaCrop model-based sensitivity analysis of soil salinity dynamics and productivity under climate change in sandy-layered farmland. *Agricultural Water Management*, 307, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109244>
- Gastelo, M., Bastos, C., Ortiz, R., & Blas, R. (2025). Environmental impact and phenotypic stability in potato clones resistant to late blight *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary, resilient to climate change in Peru. *PLoS one*, 20(2), e0318255. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318255>
- Huerta, A., Aybar, C., Imfeld, N., Correa, K., Felipe, O., Rau, P., Drenkhan, F., & Lavado, W. (2023). High-resolution grids of daily air temperature for Peru - the new PISCOt v1.2 dataset. *Scientific Data*, 10, 847. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02777-w>
- Kibebew, S., Dechassa, N., Alemayehu, Y., Merga, F., & Megersa, G. (2026). Analysis of historical climate change and its impacts on bread wheat (*Triticum aestivum* L.) production in Central Oromia, Ethiopia. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 9(1), e70317. <https://doi.org/10.1002/agg2.70317>
- Li, N., Li, Y., Yang, Q., Biswas, A., & Dong, H. (2024). Simulating climate change impacts on cotton using AquaCrop model in China. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2024.103897>
- Llaczka, A., Acuña, D., Jácome, G., De la Cruz, G., Paredes, J., Bruno, J., Alvarez, E., Flores, W., Urdanivia, F., & Sulca, B. (2021). Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: Cambios en el clima promedio. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C., & Moggiano, N. (2021). Climate change in the Andes and its impact on agriculture: a systematic review. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Lakatos, L., Misik, T., Csabai, E. K., & Cs, P. (2023). Climate Change and Potato Cultivation: A Geographical Shift and Its Implications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1242(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1242/1/012003>
- Misgina, N. A., Beshir, H. M., Yohannes, D. B., & Gebreyohanes, G. H. (2024). Growth, Yield, and Water Productivity of Potato Genotypes Under Supplemental and Non-Supplemental Irrigation in Semi-Arid Areas of Northern Ethiopia. *Agronomy*, 15(1), 72. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010072>
- Nazrul, F. B., Karim, M. R., Pavan, W., & Kamruzzaman, M. (2026). Future climate extremes in Bangladesh: insights from a multi-model ensemble of CMIP6 simulations. *Earth Systems and Environment*, 10, 1369–1388. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00681-4>
- Phung, T. D., Kieu Tram Thi Huynh, Van Tuan Phan, & Dang Truong An. (2025). Crop Calendar Adjustments for Enhanced Rainwater Harvesting in Rice Cultivation of the Plain of Reeds Under Climate Variability. *Research in Ecology*, 7(2), 239–250. <https://doi.org/10.30564/re.v7i2.10067>
- Pinheiro, A. G., Alves, C. P., de Souza, C. A. A., Júnior, G. D. N. A., Jardim, A. M. D. R. F., de Moraes, J. E. F., ... & da Silva, T. G. F. (2024). Calibration and validation of the AquaCrop model for production arrangements of forage cactus and grass in a semi-arid environment. *Ecological Modelling*, 488, 110606. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110606>
- Poma-Chamana, R., Flores-Marquez, R., Cordova-Tadeo, J., Quello, A., Arapa-Quispe, J., & Solórzano-Acosta, R. (2025). Transformation of Terraces with Irrigation Systems: Profitability and Water Savings in Potato Crop (*Solanum tuberosum* L.). *Water*, 17(5), 668. <https://doi.org/10.3390/w17050668>
- Puma-Cahua, J., Belizario, G., Laqui, W., Alfaro, R., Huaquisto, E., & Calizaya, E. (2024). Evaluating the Yields of the Rainfed Potato Crop under Climate Change Scenarios Using the AquaCrop Model in the Peruvian Altiplano. *Sustainability*, 16(1), 71. <https://doi.org/10.3390/su16010071>
- Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Sistema GIRH-TDPS. (2021). Escenarios climáticos en el sistema hídrico del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y salar de Coipasa.
- SENAMHI (2025). Escenarios de cambio climático al 2050 en el Perú: Clima medio e índice multipeligro. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., Huang, X.-Y. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR. 73 pp. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Southern, M. D., Kumar, M. G., & Blauer, J. M. (2025). Cultivars and Their Developmental Phases Interact with Temperature Fluctuations to Modulate Growth, Productivity and Seed Tuber Physiology of Potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Plants*, 14(5), 750. <https://doi.org/10.3390/plants14050750>
- Tasneem, K. T., Shahzad, M. U., Rashid, J., Othman, K. M., Zafar, T., & Faheem, M. (2025). Predicting rice yield and impact of climate change on rice production using machine learning models. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(12), 665. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05912-2>
- TDPS (2021). Escenarios climáticos en el sistema hídrico del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y salar de Coipasa. Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Sistema. <https://girh-tdps.com/cambio-climatico/>
- Tran, B., Tseng, W., & Chen, C. (2025). Climate change impacts on crop yields across temperature rise thresholds and climate zones. *Scientific Reports*, 15, 23424. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07405-8>
- Zevallos, E., Marmolejo, K., Alvarez, F., Paitan, R., Viza, I., Becerra, D., Rixi, G., Silva-Díaz, C., & Inga, J. (2023). Screening Potato Landraces to Cope with Climate Change in the Central Andes

- of Peru. *International Journal of Plant Biology*, 14(4), 1167-1179. <https://doi.org/10.3390/ijpb14040085>
- Visscher, A. M., Vanek, S., Huaraca, J., Mendoza, J., Ccanto, R., Meza, K., ... & Fonte, S. J. (2024). Traditional soil fertility management ameliorates climate change impacts on traditional Andean crops within smallholder farming systems. *Science of the Total Environment*, 912, 168725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168725>
- Wang, H., Cheng, M., Liao, Z., Guo, J., Zhang, F., Fan, J., ... & Wang, X. (2023). Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-Potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes. *Agricultural Water Management*, 276, 108076. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108076>
- Xiao, W., Boucher, S. R., & Sexton, R. J. (2025). Local conditions matter: Climate change and coffee production in Brazil. *Climatic Change*, 178(10), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-04037-9>