

## Impacto del riesgo climático en la rentabilidad del cultivo de mango (*Mangifera indica*) en Chilaco-Lancones mediante simulación Monte Carlo

*Impact of climate risk on the profitability of mango (*Mangifera indica*) cultivation in Chilaco-Lancones using Monte Carlo simulation*

  Antonella Isabel Bazán Hidalgo<sup>\*\*</sup>

  Gracia Bendita Astudillo Cruz<sup>1</sup>

  Abner Gabriel Rugel Mendoza<sup>1</sup>

  Yesenia Saavedra Navarro<sup>1</sup>

  Cristhian Nicolás Aldana Yarlequé<sup>1</sup>

  Carlos Enrique Oballe Neyra<sup>1</sup>

  Wilmer Enrique Moncada Sosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Económica, Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

### \*Correspondencia:

Bazán Hidalgo, Antonella Isabel

Fecha de recepción : 22/12/2025

Fecha de Revisión : 06/03/2026

Fecha de aceptación : 25/05/2026

Fecha de publicación : 15/06/2026

**Como citar:** Bazán Hidalgo, A.I.; Astudillo Cruz, G.B.; Rugel Mendoza, A.G.; Saavedra Navarro, Y.; Aldana Yarlequé, C.N.; Oballe Neyra, C.E. y Moncada Sosa, W.E. (2026). Impacto del riesgo climático en la rentabilidad del cultivo de mango (*Mangifera indica*) en Chilaco-Lancones mediante simulación Monte Carlo. *Revista de Investigación Científica de la UNF-Aypate*, 5(2), 35–52. <https://doi.org/10.57063/ricay.v5i2.234>

## RESUMEN

El cambio climático genera impactos significativos en la agricultura tropical, afectando la rentabilidad del cultivo de mango (*Mangifera indica*) en Sullana, Perú. El objetivo del estudio fue estimar el impacto económico del riesgo climático en la rentabilidad del cultivo de mango en Chilaco-Lancones mediante la simulación Monte Carlo. Se empleó un diseño no experimental con enfoque mixto, utilizando datos climáticos correspondientes al periodo 2023–2024 obtenidos de entidades oficiales y registros productivos de 12 agricultores locales seleccionados mediante muestreo intencional. A partir de estos datos se implementó un modelo de simulación Monte Carlo en Python con 10 000 iteraciones por escenario, considerando variaciones en temperatura, precipitación y humedad. Los resultados evidenciaron pérdidas promedio de S/.22 958.77 en el escenario normal y de S/.68 306.75 en el escenario cálido-seco, mientras que el escenario húmedo-frío generó ganancias promedio de S/.22 321.44. Se concluye que la rentabilidad del cultivo de mango presenta una alta sensibilidad frente a la variabilidad climática, lo que confirma la utilidad de la simulación Monte Carlo como herramienta para evaluar escenarios de riesgo económico en sistemas agrícolas.

**Palabras clave:** Riesgo climático, rentabilidad agrícola, Monte Carlo, mango, cambio climático

### ABSTRACT

Climate change is having a significant impact on tropical agriculture, affecting the profitability of mango (*Mangifera indica*) cultivation in Sullana, Peru. The objective of this study was to estimate the economic impact of climate risk on the profitability of mango cultivation in Chilaco-Lancones using Monte Carlo simulation. A non-experimental, mixed-methods design was employed, using climate data from 2023–2024 obtained from official sources and production records from 12 local farmers selected through purposive sampling. Based on this data, a Monte Carlo simulation model was implemented in Python with 10,000 iterations per scenario, considering variations in temperature, precipitation, and humidity. The results showed average losses of S/.22,958.77 in the Normal scenario and S/.68,306.75 in the Warm-Dry scenario, while the Humid-Cold scenario generated average gains of S/.22,321.44. It is concluded that the profitability of mango cultivation is highly sensitive to climate variability, which confirms the usefulness of Monte Carlo simulation as a tool to evaluate economic risk scenarios in agricultural systems.

**Keywords:** Climate risk, agricultural profitability, Monte Carlo, mango, climate change.

## 1. INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica*) es una de las frutas tropicales más importantes a nivel mundial, no solo por su valor alimenticio, sino también por el papel económico que cumple en distintas regiones productoras (FAO, 2022). En el caso de Perú, este cultivo se ha posicionado como un producto de gran relevancia para el comercio nacional e internacional, siendo una fuente esencial de ingresos y desarrollo económico para miles de familias en la provincia de Sullana, particularmente en la zona de Chilaco-Lancones (MINAM, 2023). No obstante, esta actividad enfrenta crecientes desafíos, pues el cambio climático ha intensificado la variabilidad de factores como la temperatura, las precipitaciones y la ocurrencia de fenómenos extremos, afectando la estabilidad y el rendimiento de los cultivos (FAO, 2022). Los agricultores identifican como principales

efectos a la reducción de la producción, las altas temperaturas, las estaciones secas más largas, los cambios en las lluvias, las inundaciones y el bajo desarrollo de las plantas jóvenes, lo que evidencia que el cultivo de mango es especialmente sensible a las variaciones del clima (Ogundobe et al., 2024).

Para evaluar la incertidumbre y cuantificar los posibles impactos económicos derivados de esta variabilidad climática, las técnicas de simulación probabilística han sido ampliamente utilizadas en estudios agroclimáticos (Vargas y Ramírez, 2023). En particular, el método de simulación Monte Carlo permite generar miles de escenarios alternativos a partir de distribuciones de probabilidad de las variables climáticas, lo que facilita estimaciones de riesgo más robustas para el rendimiento de cultivos y sus implicancias económicas (Amorim et al.,

2024). Esta técnica, que utiliza repeticiones aleatorias y distribuciones de probabilidad para modelar fenómenos inciertos, se configura como una metodología eficaz para modelar la incertidumbre climática y estimar su impacto económico, entendido como el conjunto de efectos financieros que se reflejan en pérdidas de ingresos, incremento de costos y reducción de la rentabilidad (Hultgren et al., 2025). La aplicación de estas herramientas es pertinente dado que el riesgo climático, definido como el resultado de la interacción entre el peligro de eventos climáticos extremos, la exposición y la vulnerabilidad de los sistemas (Shah et al., 2021), se ha consolidado como una de las principales amenazas para la agricultura, generando incertidumbre económica y mayor vulnerabilidad para los agricultores (Li et al., 2024).

En el contexto de la agricultura peruana, la aplicación de herramientas avanzadas de modelado para evaluar el riesgo climático aún es incipiente, lo que evidencia una brecha en la capacidad de adaptación de los productores (Vargas y Ramírez, 2023). Si bien diversas investigaciones han demostrado la sensibilidad de los cultivos tropicales a las variaciones climáticas, como los estudios realizados en Egipto que identificaron efectos negativos de incrementos térmicos y de humedad sobre la productividad del mango (Mohamme et al., 2025; Rania et al., 2023), y a nivel nacional se han señalado limitaciones productivas asociadas a condiciones climáticas adversas (Bolaños, 2023; Lozano-Povis et al., 2021), aún existe una

limitada evidencia empírica que vincule directamente los factores climáticos a los efectos económicos en los pequeños productores. En este sentido, el objetivo del presente estudio fue estimar el impacto económico del riesgo climático en la producción de Mangifera indica en Chilaco-Lancones, Sullana. Para ello, se implementó un modelo de simulación Monte Carlo en Python utilizando datos climáticos secundarios provenientes de entidades oficiales (SENAMHI, MINAGRI e INEI) y datos primarios recolectados de productores locales. Todo ello con el fin de identificar las variables climáticas que influyen en la producción, generar escenarios de riesgo climático y analizar su impacto en la rentabilidad del cultivo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Diseño de la investigación

La investigación fue de tipo aplicada, con un diseño no experimental y un alcance descriptivo y correlacional, ya que buscó analizar el impacto del riesgo climático en la rentabilidad del cultivo de mango. Asimismo, se utilizó un enfoque mixto que combinó datos cuantitativos de variables climáticas y productivas con información cualitativa obtenida de las percepciones de los agricultores de Chilaco-Lancones, en la provincia de Sullana.

### 2.2 Población y muestra

La población estuvo conformada por los agricultores dedicados al cultivo de mango en Chilaco, quienes dependen directamente de esta actividad. Se seleccionó una muestra conformada por 12 productores seleccionados mediante muestreo no probabilístico intencional, considerando su experiencia en el cultivo

y la disponibilidad de información productiva. Si bien este tipo de muestreo permite obtener información detallada del sistema productivo local, se reconoce que el tamaño de muestra limita la generalización de los resultados a toda la población de productores de la zona, por lo que los hallazgos deben interpretarse como una aproximación exploratoria al impacto del riesgo climático en el cultivo.

### 2.3 Variables de estudio

Se estableció como variable independiente el riesgo climático, asociado a la variación de la temperatura, la precipitación y la humedad, mientras que la variable dependiente fue el impacto económico del cultivo, expresado en ingresos, costos y rentabilidad.

### 2.4 Recolección de datos

Para obtener la información se aplicaron dos técnicas complementarias. Por un lado, se realizó una revisión documental de fuentes oficiales como el SENAMHI, el MINAGRI y el INEI, que proporcionaron datos climáticos del periodo 2023–2024. Por otro lado, se aplicaron encuestas estructuradas a los productores seleccionados para recopilar información sobre producción, costos, rendimientos y percepciones frente a la variabilidad climática. Los datos fueron organizados en matrices de registro y verificados antes del análisis.

### 2.5 Simulación Monte Carlo

Con el fin de estimar los posibles efectos económicos del riesgo climático, se aplicó la simulación Monte Carlo mediante el software Python 3.12 y las

librerías NumPy, Pandas y Matplotlib. La simulación se ejecutó con 10 000 iteraciones por escenario, variando aleatoriamente en  $\pm 10\%$  las referidas a la temperatura, precipitación y humedad. Se definieron tres escenarios: el normal, el cálido–seco y el húmedo–frío, representando distintas condiciones climáticas observadas en la zona.

Para representar la respuesta productiva del cultivo frente a la variabilidad climática, se incorporó una función de sensibilidad productiva que ajusta el rendimiento en función de las variaciones relativas de temperatura, precipitación y humedad respecto a sus valores promedio observados. De esta manera, incrementos térmicos extremos o reducciones en la disponibilidad hídrica generan disminuciones en el rendimiento estimado, mientras que condiciones climáticas moderadas tienden a favorecer la productividad del cultivo.

### 2.6 Análisis estadístico

Finalmente, se realizó un análisis descriptivo y correlacional utilizando el coeficiente de Pearson para identificar la relación entre las variables climáticas y la producción. A partir de los resultados de la simulación se calcularon los promedios, desviaciones estándar y percentiles 5 y 95, considerando un nivel de significancia de  $p < 0.05$ .

## 3. RESULTADOS

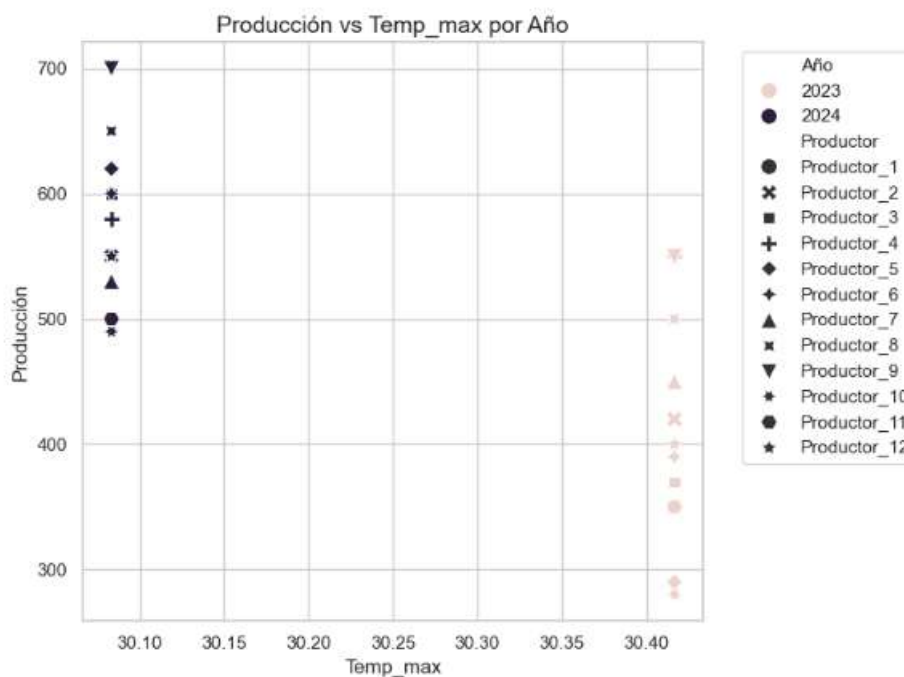
### 3.1 Identificación de las variables climáticas que afectan la producción de mango

Para identificar las variables climáticas que influyen en la producción de

Mangifera indica en Chilaco–Lancones, se recopilaron datos de temperatura máxima, mínima, precipitación y humedad relativa de los años 2023 y 2024 procedentes de SENAMHI, MINAGRI e INEI. Estos datos fueron procesados en Python para obtener los promedios anuales de Cada variable y representar el comportamiento climático de ambos años.

A partir de estos promedios anuales, se integraron con los datos de producción reportados por los agricultores y se elaboró una matriz de correlación para analizar la relación entre las variables climáticas y el rendimiento del cultivo, utilizando el coeficiente de Pearson para determinar el grado y sentido de dicha asociación.

**Figura 1**  
*Relación entre Producción y Temperatura Máxima (°C) por Año*



La figura evidencia que la temperatura máxima presenta un comportamiento distinto entre ambos años analizados. En 2023, los valores se ubicaron en 30.4°C, mientras que en 2024 disminuyeron ligeramente a 30.1°C. Aunque la variación es pequeña, se relaciona de manera clara con los niveles de producción registrados por los productores, lo cual coincide con

la sensibilidad térmica conocida del cultivo de mango.

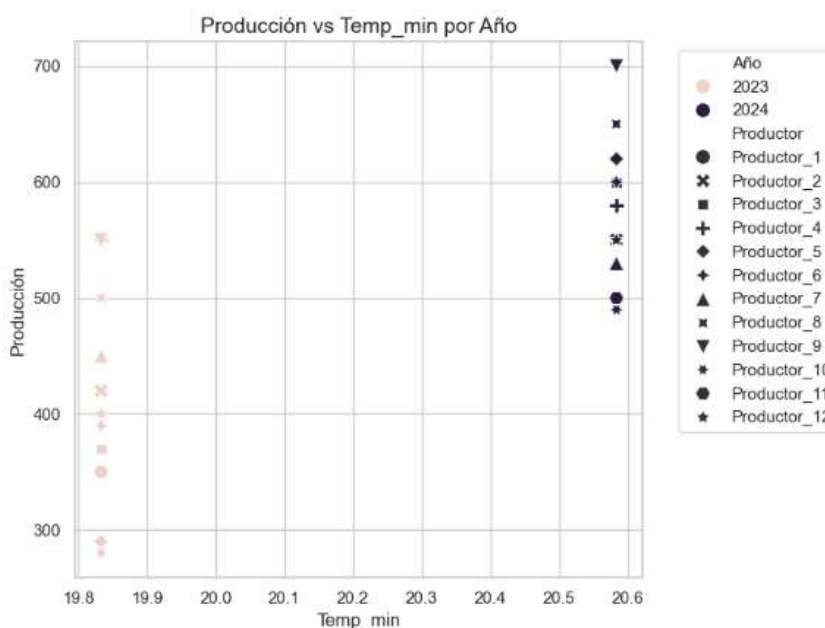
En 2023, la producción se concentró aproximadamente entre 280 y 550 cajas por hectárea, mostrando una tendencia descendente a medida que la temperatura máxima aumentaba. Este comportamiento sugiere que el cultivo experimentó un mayor nivel de estrés

térmico, afectando procesos como la floración y el llenado de fruto. En cambio, en 2024, cuando la temperatura máxima fue ligeramente menor, la producción aumentó notablemente, situándose entre 490 y 700 cajas por hectárea. El patrón

conjunto de la figura muestra que todos los productores obtuvieron mejores rendimientos en 2024, lo que refuerza la existencia de una relación inversa entre la temperatura máxima y la producción del mango.

**Figura 2**

*Relación entre Producción y Temperatura Mínima (°C) por Año*



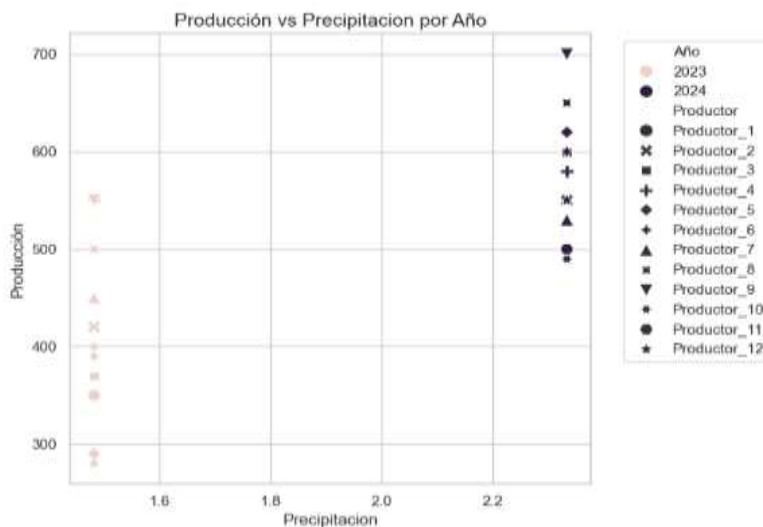
La figura de temperatura mínima muestra que en 2023 los valores se ubicaron en 19.8°C, mientras que en 2024 aumentaron ligeramente hasta 20.6°C. Esta diferencia, aunque moderada, es relevante para el mango, ya que las temperaturas nocturnas inciden en la estabilidad fisiológica del cultivo.

En 2023, la producción se ubicó en un rango de 280 a 550 cajas/ha, lo que refleja un rendimiento limitado bajo temperaturas nocturnas más frías. En 2024, con temperaturas mínimas algo más cálidas, la producción aumentó de

manera uniforme entre los productores, alcanzando entre 490 y 700 cajas/ha.

La figura evidencia una tendencia positiva: a mayor temperatura mínima, dentro de un rango adecuado, mayor es la producción. Esto sugiere que condiciones nocturnas más estables y menos frías favorecieron el crecimiento y la fructificación durante 2024.

**Figura 3**  
*Producción vs Precipitación (mm) por Año*



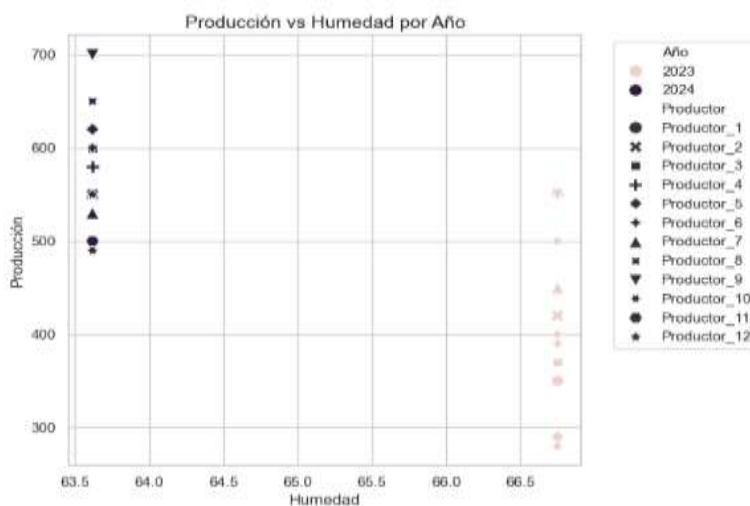
La figura correspondiente a la precipitación muestra un contraste marcado entre los años evaluados. En 2023, los valores estuvieron en 1.5 mm., niveles reducidos que limitan la disponibilidad hídrica para el cultivo. Esta condición se reflejó en producciones que oscilaron entre 280 y 550 cajas/ha, evidenciando que el déficit de agua impactó negativamente en el rendimiento.

En 2024, la precipitación aumentó a 2.3 mm., lo cual generó un entorno más

favorable para el cultivo. Los rendimientos se incrementaron notablemente, concentrándose entre 490 y 700 cajas/ha.

La figura muestra una relación clara: conforme aumenta la precipitación, la producción también mejora. Este comportamiento refuerza la importancia del aporte hídrico en el desempeño del mango, especialmente en zonas de clima cálido-seco como Lancones.

**Figura 4**  
*Producción vs Humedad relativa (%) por Año*



La figura de humedad relativa muestra que en 2023 los valores se encontraron en 66.6%, mientras que en 2024 disminuyeron a 63.7%. La diferencia, aunque moderada, guarda relación con los rendimientos obtenidos por los productores.

Durante 2023, con niveles de humedad más altos, la producción se ubicó entre 280 y 550 cajas/ha, mostrando un desempeño limitado. La tendencia negativa observada indica que una

mayor humedad puede generar condiciones menos favorables para el cultivo, posiblemente por una menor eficiencia de transpiración o mayor susceptibilidad a enfermedades. En 2024, con humedad más moderada, la producción se elevó significativamente, alcanzando valores entre 490 y más de 700 cajas/ha. La figura evidencia que condiciones con menor humedad relativa favorecieron un mejor comportamiento fisiológico y productivo del mango.

**Tabla 1**

*Coefficientes de correlación entre variables climáticas y producción de mango*

Variable Climática	Coefficiente de Pearson (r)	p-value
Temperatura Máxima (°C)	-0.737	0.02
Temperatura Mínima (°C)	0.737	0.02
Precipitación (mm)	0.737	0.03
Humedad relativa (%)	-0.737	0.04

**Nota.** Valores negativos indican una relación inversa con la producción. Elaboración propia.

Los resultados de la correlación muestran que la temperatura máxima presenta una relación inversa con la producción, mientras que la precipitación evidencia una relación positiva con el rendimiento del cultivo. Los valores de significancia estadística ( $p < 0.05$ ) indican que estas relaciones son estadísticamente relevantes dentro del conjunto de datos analizado.

### 3.2 Implementación del método Monte Carlo en Python para generar escenarios de riesgo

El método Monte Carlo se empleó para generar múltiples escenarios climáticos basados en datos reales del SENAMHI correspondientes al año 2024. A partir de los registros diarios, se calcularon promedios

mensuales y luego un promedio anual que sirvió como base para la simulación, obteniéndose una temperatura máxima de 33.11°C, una humedad relativa de 75.72% y una precipitación promedio de 0.21 mm. Con estos valores, se realizaron 10,000 iteraciones por escenario, incorporando además datos productivos, de costos y precios obtenidos de 12 productores de Chilaco-Lancones. En cada iteración, las variables climáticas fueron modificadas aleatoriamente siguiendo distribuciones normales determinadas por las desviaciones estándar reales. Esto permitió representar rigurosamente la variabilidad climática local.

Se definieron tres escenarios principales de riesgo climático:

- **Escenario normal:** reproduce las condiciones promedio observadas en 2024, incorporando únicamente variaciones aleatorias derivadas de la desviación estándar anual.
- **Escenario cálido-seco:** simula un aumento de 2°C en la temperatura máxima, una reducción de 0.5 mm. en la precipitación y una disminución de 5% en la humedad relativa, representando un entorno de sequía o estrés térmico.
- **Escenario húmedo-frío:** aplica una disminución de 2°C en la temperatura, un incremento de 0.5 mm. en la precipitación y un aumento de 5% en la humedad, reflejando un ambiente más fresco y húmedo.

El modelo de simulación integró una función de sensibilidad productiva que ajusta el rendimiento según las condiciones climáticas: la producción disminuye ante temperaturas extremas o baja humedad y mejora bajo condiciones moderadas. Cada iteración generó así una estimación actualizada de producción y, posteriormente, una ganancia económica calculada a partir del ingreso por ventas y los costos promedio declarados por los agricultores. Los resultados finales se sintetizaron en una tabla que muestra, para cada escenario, los valores de media, la desviación estándar, los percentiles extremos y la probabilidad de pérdida económica.

**Tabla 2**

*Resultados de la simulación Monte Carlo para escenarios de riesgo*

Clima	Media	Desviación	Percentil_5	Percentil_95	Prob_pérdida
Normal	-22958.77	4698.62	-30690.70	-15274.16	100.0
Cálido-Seco	-68306.75	4711.66	-76065.83	-60723.24	100.0
Húmedo-Frío	22321.44	4718.31	14597.78	30103.08	0.0

**Nota.** Valores negativos en la media indican pérdidas económicas estimadas para los productores bajo las condiciones climáticas simuladas. Elaboración propia.

Al finalizar la simulación se obtuvieron 30,000 iteraciones, cuyos valores individuales de temperatura, precipitación, humedad y rentabilidad fueron registrados en el archivo

*simulaciones\_completas.xlsx*. Para mostrar el comportamiento microeconómico del modelo, la figura 5 incluye diez escenarios seleccionados aleatoriamente.

**Figura 5**

Resultados de la simulación Monte Carlo (primeras 10 filas)

```

=== Escenarios simulados individuales (primeras 10 filas) ===
Escenario Iteracion Temp_max Precipitacion Humedad Ganancia_total
0 Normal 1 31.708287 -0.059536 70.641316 -23150.362090
1 Normal 2 31.855670 0.646765 74.822833 -24874.297188
2 Normal 3 33.127762 -0.797450 79.958894 -20031.262058
3 Normal 4 35.796835 0.463332 78.227732 -20176.840313
4 Normal 5 31.676306 -0.706938 75.414600 -27815.933329
5 Normal 6 32.903611 0.337060 72.201195 -18494.810783
6 Normal 7 32.538768 -0.508932 78.191793 -17229.544255
7 Normal 8 34.168550 -0.214053 77.771552 -25386.178403
8 Normal 9 32.626712 -0.635679 69.377031 -22078.305996
9 Normal 10 33.473238 -0.714403 79.183672 -19455.852344

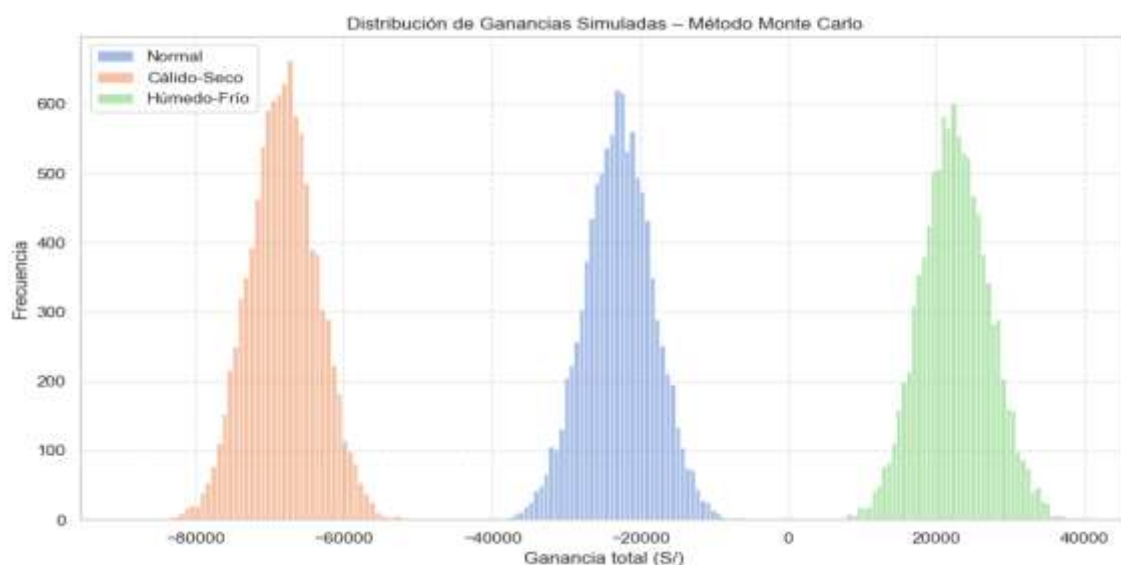
Archivo 'simulaciones_completas.xlsx' creado con éxito.
    
```

Estos casos permiten visualizar cómo incluso pequeñas variaciones climáticas basadas en parámetros reales del SENAMHI y en los promedios productivos locales generan cambios

significativos en la rentabilidad, lo que confirma la alta sensibilidad del sistema productivo del mango frente a la incertidumbre climática.

**Figura 6**

Distribución de Ganancias Simuladas



### 3.3 Análisis del impacto económico en la rentabilidad de productores bajo diferentes escenarios climáticos

La Figura 6 presenta la distribución de ganancias simuladas para los tres escenarios climáticos evaluados mediante el método Monte Carlo (normal, cálido-seco y húmedo-frío), donde cada uno presenta 10 000 iteraciones. Estas distribuciones muestran los valores obtenidos a partir de la combinación de los parámetros climáticos ajustados y las variables económicas promedio de los productores de mango de Chilaco-Lancones.

En el escenario normal, las simulaciones se concentran alrededor de valores cercanos a -22958.77 soles, lo que refleja el comportamiento económico bajo las condiciones climáticas habituales de la zona. La forma de la distribución presenta una dispersión moderada alrededor de la media estimada.

En el escenario cálido-seco, la distribución se desplaza hacia valores de pérdida más elevados, alcanzando aproximadamente -68306.75 soles, resultado de la simulación de condiciones de mayor temperatura y menor disponibilidad hídrica, demostrando que este escenario presenta el rango de pérdidas más amplio entre los tres escenarios evaluados.

En el escenario húmedo-frío, la distribución se ubica en un rango predominantemente positivo, con valores alrededor de 22321.44 soles, lo que refleja el comportamiento económico bajo condiciones de mayor humedad y

temperaturas ligeramente más bajas. Este escenario presenta la mayor concentración de valores asociados a ganancias dentro del conjunto de simulaciones.

Finalmente, la figura permite visualizar cómo cada tipo de condición climática genera patrones claramente diferenciados en las ganancias estimadas, lo que demuestra la variación de los resultados económicos según los escenarios simulados. Este comportamiento evidencia la relevancia de las condiciones climáticas en la variabilidad de los resultados obtenidos a partir del método Monte Carlo.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1 Identificación de las variables climáticas que afectan la producción de mango

Los resultados obtenidos evidencian que la temperatura máxima, la mínima, la precipitación y la humedad relativa influyen de manera significativa en la producción de mango en Chilaco-Lancones. Las diferencias observadas entre los años 2023 y 2024 muestran que incluso variaciones climáticas moderadas pueden generar cambios importantes en el rendimiento del cultivo. Este comportamiento coincide con lo señalado por Khalifa y Abobatta (2023), quienes destacan que el mango presenta una alta sensibilidad a las fluctuaciones térmicas, particularmente durante las etapas de floración y desarrollo del fruto.

En el caso de la temperatura máxima, los resultados evidencian una relación

inversa con la producción. Durante 2023, cuando se registraron valores ligeramente más altos, los niveles de producción fueron menores en comparación con el año 2024. Este comportamiento puede explicarse porque temperaturas elevadas incrementan el estrés térmico en las plantas, afectando procesos fisiológicos como la floración, la polinización y el llenado del fruto.

Por su parte, la temperatura mínima mostró una relación positiva con la productividad. Las noches ligeramente más cálidas registradas en 2024 favorecieron un mejor desempeño productivo del cultivo, lo que coincide con lo planteado por Rania et al. (2023), quienes señalan que la estabilidad térmica nocturna contribuye al desarrollo fisiológico del mango y mejora la eficiencia de los procesos metabólicos de la planta.

Respecto a la precipitación, los resultados muestran una relación positiva con el rendimiento del cultivo. En 2023, los bajos niveles de precipitación limitaron la disponibilidad hídrica para las plantas, mientras que en 2024 el incremento de las lluvias permitió condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo. Este comportamiento es consistente con estudios agroclimáticos que indican que el mango requiere un suministro hídrico adecuado durante las fases de crecimiento y fructificación para alcanzar niveles óptimos de productividad.

Finalmente, la humedad relativa mostró una relación inversa con la producción, ya

que niveles excesivos pueden generar condiciones propicias para enfermedades o reducir la eficiencia de la transpiración en las plantas. En este sentido, los resultados sugieren que condiciones de humedad moderada favorecen un mejor desempeño productivo del cultivo.

#### **4.2 Implementación del método Monte Carlo en Python para generar escenarios de riesgo**

La aplicación del método de simulación Monte Carlo permitió modelar la incertidumbre asociada a la variabilidad climática que afecta la producción de mango en Chilaco–Lancones. A través de 10 000 iteraciones por escenario, el modelo permitió generar múltiples combinaciones posibles de temperatura, precipitación y humedad, proporcionando una estimación probabilística de los resultados económicos del cultivo.

Los resultados muestran diferencias claras entre los escenarios evaluados.

En el escenario normal, la rentabilidad promedio resultó negativa, lo que sugiere que, incluso bajo condiciones climáticas habituales, los productores pueden enfrentar riesgos económicos asociados a la variabilidad ambiental. Este resultado coincide con lo señalado por Hultgren et al. (2025), quienes indican que pequeñas variaciones climáticas pueden suscitar impactos económicos relevantes en sistemas agrícolas sensibles.

En el escenario cálido–seco, las pérdidas económicas fueron considerablemente

mayores, lo que refleja el efecto negativo de temperaturas elevadas combinadas con una menor disponibilidad hídrica. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Manescu et al. (2025), quienes destacan que los eventos climáticos extremos incrementan significativamente el riesgo económico en la agricultura.

Por el contrario, el escenario húmedo-frío presentó resultados económicos positivos, lo que sugiere que condiciones climáticas más moderadas pueden favorecer la productividad del cultivo y mejorar la rentabilidad de los productores. Este comportamiento coincide con estudios que indican que ambientes térmicos más estables y con mayor disponibilidad hídrica pueden contribuir a mejorar el rendimiento de los cultivos tropicales.

En conjunto, estos resultados evidencian que la variabilidad climática constituye un factor determinante en la rentabilidad del cultivo de mango en la zona de estudio y confirman la utilidad de la simulación Monte Carlo como herramienta para evaluar escenarios de riesgo económico en sistemas agrícolas.

### **4.3 Análisis del impacto económico en la rentabilidad de productores bajo diferentes escenarios climáticos**

Los resultados obtenidos mediante la simulación Monte Carlo muestran que la rentabilidad del cultivo de mango en Chilaco-Lancones presenta una marcada sensibilidad frente a las variaciones climáticas introducidas en los tres escenarios evaluados. El hallazgo

más relevante es la diferencia sustancial en las ganancias simuladas entre los contextos cálido-seco, normal y húmedo-frío, lo que confirma que el clima constituye un determinante directo del desempeño económico del cultivo.

En términos interpretativos, los resultados respaldan la hipótesis planteada, ya que las alteraciones en temperatura, humedad y precipitación generaron variaciones significativas en la rentabilidad estimada.

El escenario cálido-seco produjo las mayores pérdidas, mientras que el escenario húmedo-frío redujo considerablemente el nivel de riesgo económico. Esto indica que el cultivo responde negativamente al estrés térmico y a la disminución hídrica, mientras que mejora su comportamiento bajo condiciones más frescas y con mayor disponibilidad de humedad, lo cual coincide con la fisiología conocida del mango y su sensibilidad a cambios extremos en el clima.

Al comparar estos hallazgos con la literatura existente, se observa coherencia con los estudios de Mohammed et al. (2025), quienes reportan reducciones de rendimiento asociadas al incremento de temperatura, y con lo expuesto por Rania et al. (2023), quienes señalan que las etapas de floración y fructificación son especialmente vulnerables al estrés térmico. Asimismo, el comportamiento favorable observado en el escenario húmedo-frío complementa la evidencia presentada en trabajos nacionales como

el de Bolaños (2023), aunque este último no cuantificó el impacto económico mediante simulación probabilística. En este sentido, el presente estudio aporta un componente metodológico adicional al integrar variabilidad climática y resultados económicos, ofreciendo una visión más precisa del riesgo productivo.

Las implicaciones prácticas de estos resultados son relevantes para la gestión agrícola, ya que permiten identificar con mayor claridad los escenarios críticos que incrementan la vulnerabilidad del productor. La información generada por la simulación puede servir como insumo para la toma de decisiones técnicas especialmente en manejo de riego, estrategias de adaptación y mecanismos de cobertura ante el riesgo climático orientados a reducir la exposición a pérdidas en años cálido-secos y a optimizar la producción cuando las condiciones son más húmedas y frías.

Finalmente, es importante señalar algunas limitaciones inherentes al estudio.

La base climática utilizada corresponde a registros disponibles para el 2024, lo que restringe la amplitud temporal de las estimaciones; además, la muestra de productores considerada (12 encuestados) introduce un grado de variabilidad que podría ampliarse con futuras investigaciones. Asimismo, la simplificación del modelo productivo mediante el uso de promedios de producción, costos y precios implica una aproximación general que, si bien es suficiente para la simulación, no captura

toda la heterogeneidad del manejo agrícola. No obstante, es importante reconocer algunas limitaciones del estudio. El modelo de simulación Monte Carlo se basa en datos climáticos observados y en información productiva recopilada de productores locales, lo que permite representar de manera aproximada la dinámica del sistema productivo analizado. Sin embargo, el modelo no incorpora procedimientos de validación cruzada ni comparaciones con series históricas más amplias de producción agrícola. En este sentido, futuras investigaciones podrían integrar bases de datos climáticas de mayor extensión temporal y aplicar técnicas adicionales de validación para fortalecer la capacidad predictiva de los modelos de simulación aplicados al análisis del riesgo climático en sistemas agrícolas.

## 5. CONCLUSIONES

Se determinó que las variables climáticas con mayor incidencia en la producción de mango en Chilaco-Lancones son la temperatura máxima, la precipitación y la humedad relativa. Asimismo, estas variables condicionan directamente los procesos fisiológicos del cultivo, influyendo en su rendimiento y rentabilidad. Por ello, se observó que las temperaturas elevadas y la humedad excesiva reducen la productividad, mientras que precipitaciones moderadas favorecen el desarrollo del fruto. En este sentido, se reafirma la necesidad de mantener un equilibrio térmico e hídrico adecuado, junto con el monitoreo constante de las condiciones climáticas,

para garantizar la estabilidad productiva y económica de los agricultores.

La implementación del método Monte Carlo en Python permitió evidenciar que la rentabilidad del cultivo de mango en Chilaco-Lancones es altamente vulnerable a la variabilidad climática, ya que incluso bajo condiciones normales la probabilidad de pérdidas económicas es elevada debido a la sensibilidad del cultivo frente a fluctuaciones de temperatura, humedad y precipitación. Asimismo, el escenario cálido-seco mostró el mayor nivel de riesgo, intensificando el estrés fisiológico de las plantas y generando pérdidas significativamente superiores, mientras que el escenario húmedo-frío evidenció que condiciones más frescas y con mayor disponibilidad hídrica pueden mejorar notablemente la productividad y la rentabilidad. Estos resultados demuestran que la simulación Monte Carlo es una herramienta efectiva para anticipar y cuantificar escenarios de riesgo, destacando la importancia de implementar estrategias de adaptación que fortalezcan la resiliencia climática del cultivo en esta zona productiva.

Finalmente, los resultados de las simulaciones muestran que la rentabilidad del cultivo de mango depende críticamente de las condiciones climáticas, mostrando pérdidas significativas tanto en el escenario normal como en el cálido-seco, donde el estrés térmico y la baja disponibilidad hídrica intensifican la vulnerabilidad productiva y económica de los agricultores; en contraste, el escenario

húmedo-frío revela un comportamiento más favorable al elevar la probabilidad de obtener ganancias y mejorar el rendimiento del cultivo, lo que confirma que las variaciones moderadas de humedad y temperatura influyen de manera determinante en la estabilidad financiera de los productores. De este modo, la evaluación del impacto económico demuestra que la actividad agrícola permanece expuesta a un alto nivel de riesgo climático, justificando la necesidad de estrategias de adaptación que incrementen la resiliencia productiva.

## 6. CONFLICTOS DE INTERÉS

Declaramos que la investigación se ha llevado a cabo en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses.

## 7. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

AGRM: Conceptualización, Recursos, Análisis Formal, Metodología, Investigación, Escritura – Borrador Original.

GBAC: Metodología, Análisis Formal, Software, Curación de datos, Recursos, Escritura – borrador original.

AIBH: Conceptualización, Software, Análisis Formal, Supervisión, Administración de proyectos, Recursos, Visualización, Escritura – borrador original.

YNS: Redacción – revisión y edición.

CNAY: Redacción – revisión y edición.

CEON: Redacción – revisión y edición.

WEMS: Redacción – revisión y edición.

### 8. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido posible gracias al apoyo institucional de la Universidad Nacional de Frontera, en especial a la Facultad de Ciencias Económicas y Ambientales, así como al Programa de Ingeniería Económica por facilitar los recursos académicos necesarios para su desarrollo.

Los autores expresan su reconocimiento a la Dra. Yesenia Saavedra Navarro y al Dr. Cristhian Nicolás Aldana Yarlequé por su acompañamiento y orientación académica durante la elaboración del estudio. De la misma forma, al Dr. Wilmer Moncada Sosa y al docente Carlos Oballe Neyra por sus aportes metodológicos y observaciones que fortalecieron la calidad del análisis. Se agradece, también, a los productores de mango de Chilaco-Lancones por la información brindada, la misma que es indispensable para la aplicación del modelo de simulación en un contexto real. Finalmente, se extiende un agradecimiento especial a nuestras familias y compañeros por su constante apoyo y motivación a lo largo del proceso investigativo.

### 9. DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos hidrometeorológicos para este estudio

pueden encontrarse en el SENAMHI <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

### 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel, M., Salama, S., & Magdy, R. (2025). *Evaluación económica del impacto del cambio climático sobre la producción de Mangifera indica (mango) en la gobernación de Ismailia*. Journal of Environmental Sciences, 54(1), 291–307. [https://jes.journals.ekb.eg/article\\_401939\\_193dce8764d934afd48ac889627ca4ee.pdf](https://jes.journals.ekb.eg/article_401939_193dce8764d934afd48ac889627ca4ee.pdf)
- Amorim, F., Guimarães, C., Afonso, P., & Gama, M. (2024). *Forecasting crop cost risks for maize and soybean using Monte Carlo simulation*. Applied Sciences, 14(17), 8030. <https://doi.org/10.3390/app14178030>
- Bolaños, A. (2023). *Factores que limitan la producción del cultivo de mango en el valle de Santa, Áncash – Perú*. Revista Latinoamericana de Ciencias Agrarias, 1(1), 54–65. <https://revistas.peruvianscience.org/index.php/rlca/article/view/38/106>
- Chen, Y., Wang, S., Xue, Z., Hu, J., Chen, S., & Lv, Z. (2025). *Rice growth estimation and yield prediction by combining the DSSAT model and remote sensing data using the Monte Carlo Markov chain technique*. Plants, 14(8), 1206. <https://doi.org/10.3390/plants14081206>
- Food and Agriculture Organization. (2022). *Climate change and agriculture:*



- Challenges and opportunities for Latin America and the Caribbean. FAO. <https://www.fao.org>
- Habib-ur-Rahman, M., Ahmad, A., Raza, A., Hasnain, M., Alharby, H., Alzahrani, Y., Bamagoos, A., Hakeem, K., Ahmad, S., Nasim, M., Ali, M., Mansour, F., & El Sabagh, A. (2022). *Climate change impacts on agricultural production: Issues, challenges and opportunities in Asia*. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 925548. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.925548>
- Hultgren, A., Carleton, T., Delgado, M., Gergel, D., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Jina, A., Kopp, R., Malevich, S., McCusker, K., Mayer, T., Nath, I., Rising, J., Rode, A., & Yuan, J. (2025). *Global climate impacts on agriculture accounting for adaptation*. *Nature*, *642*(8068), 644–652. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w>
- Khalifa, S., & Abobatta, W. (2023). *Climate changes and mango production (temperature)*. *IgMin Research*, *1*(1), 43–46. <https://doi.org/10.61927/igmin115>
- Lozano, A., Álvarez, C., & Moggiano, N. (2021). *El cambio climático en los Andes y su impacto en la agricultura: Una revisión sistemática*. *Scientia Agropecuaria*, *12*(1), 101–108
- Manescu, A. C., Barna, F. M., Regep, H. D., Manescu, C. M., & Cerba, C. (2025). *The impact of extreme weather events on agricultural insurance in Europe*. *Agriculture*, *15*(9), 995. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090995>
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2023). *Impacto del cambio climático en la agricultura peruana*. <https://www.gob.pe/minam>
- Mohammed, M., Elsabea, A. M., Abdel Hadi, S. A., & El Beheiry, M. M. (2025). *Economic analysis of the impacts of climate change on mango yield in ismailia governorate*. *Journal of Environmental Science*, *54*(1), 291–307. <https://doi.org/10.21608/jes.2025.331689.1895>
- Li, N., Zhao, Y., Han, J., Yang, Q., Liang, J., Liu, X., & Huang, Z. (2024). *Impacts of future climate change on rice yield based on crop model simulation: A meta-analysis*. *Science of The Total Environment*, *949*, 175038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175038>
- Ogundobe, T., Esan, V., Ayegboyin, M., Ogunlaran, O., Sangoyomi, E., & Akande, J. (2024). *Farmers' perceptions of climate change impacts on mango (Mangifera indica) production in Nigeria*. *International Journal of Agronomy*, *2024*(1), 6486998. <https://doi.org/10.1155/2024/6486998>
- Rania, A., Khalil, A., & Fahim, M. (2023). *An econometric study on how climate conditions affect mango crop productivity in Egypt based on panel*



*data models. International Journal of Advanced Research, 11(3), 351–360*

Shah, H., Hellegers, P., & Siderius, C. (2021). *Climate risk for agriculture: A synthesis for defining different types of critical moments. Climate Risk Management, 34, 100378.*  
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100378>

Tongxi, H., Xuesong, Z., Sami, K., Robin, W., Guoyong, L., Elizabeth, M., Xuhui, W., Yang, L., & Kaiguang, Z. (2024). *Climate change impacts on crop yields: A review of empirical findings, statistical crop models, and machine learning methods. Environmental Modelling & Software, 179, 106119.*  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106119>

Vargas, L., & Ramírez, J. (2023). *Evaluación de riesgos climáticos en la agricultura mediante simulaciones probabilísticas. Revista Latinoamericana de Economía Agrícola, 13(2), 45–58.*  
<https://doi.org/10.1234/rlea.v13i2.456>

Yi, S., Huang, Y., Liu, Z., Zhu, Z., & Su, H. (2025). *Predicting the potential geographical distribution of mango under current and climate change scenarios based on the MaxEnt model. Frontiers in Plant Science, 16, 1633654*