

MODELO DE CRECIMIENTO LOGÍSTICO USANDO SIMULACIÓN MATEMÁTICA MONTE CARLO PARA LA PRODUCCIÓN DE CACAO EN LA PROVINCIA DE EL ORO

LOGISTIC GROWTH MODEL USING MONTE CARLO MATHEMATICAL SIMULATION FOR COCOA PRODUCTION IN EL ORO PROVINCE

José Alejandro Campoverde Jara¹, Alfredo Rodrigo Colcha Ortiz²

{jose.campoverde@unach.edu.ec¹, alfredo.colcha@unach.edu.ec²}

Fecha de recepción: 12/06/2025 / Fecha de aceptación: 26/06/2025 / Fecha de publicación: 07/01/2025

RESUMEN: El presente artículo desarrolla un modelo de crecimiento logístico, que permite realizar un análisis de la producción de cacao en la Provincia de El Oro. Se complementa con el uso de simulación matemática estocástica Monte Carlo, que sirve para estimar la producción futura del cacao en este sector del país tomando en cuenta lo inestable de los parámetros del modelo hasta el año 2030. El objetivo de esta investigación es entregar una herramienta que de información para facilitar la toma de decisiones del sector agrícola en cuanto a inversión, política y planificación estratégica que será de utilidad para el productor de cacao de la provincia de El Oro orientada a que el sistema sea sostenible. El modelo está diseñado en función de la información recabada de la página oficial del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP), donde se obtuvo las toneladas de producción anual del 2015 hasta el 2024, y así continuar con el ajuste del modelo que contiene cuatro parámetros calculados por medio de mínimos cuadrados alcanzando un coeficiente de determinación del 95%. A continuación, se aplicó el método Bootstrap sobre los residuos del modelo para junto a la simulación Monte Carlo generar 500 simulaciones, que permitieron establecer intervalos de confianza y evaluar distintos escenarios de predicción de la producción del cultivo en la provincia de El Oro del 2025 al 2030. Los resultados obtenidos nos permiten observar un comportamiento que tiende a estabilizar la producción, evidenciando un crecimiento limitado bajo las condiciones actuales.

Palabras clave: Cacao Ecuatoriano, modelo logístico, simulación Monte Carlo, predicción de producción, método Bootstrap

¹Estudiante Postgrado, Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), <https://orcid.org/0009-0000-8538-010X>.

²Docente Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), <https://orcid.org/0009-0005-2280-5189>

ABSTRACT: This article develops a logistic growth model, which allows an analysis of cocoa production in the province of El Oro. It is complemented with the use of stochastic Monte Carlo mathematical simulation, which is used to estimate future cocoa production in this sector of the country, taking into account the unstable parameters of the model until 2030. The objective of this research is to provide a tool that provides information to facilitate decision-making in the agricultural sector in terms of investment, policy and strategic planning that will be useful for cocoa producers in the province of El Oro to make the system sustainable. The model is designed based on the information collected from the official website of the Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries (MAGAP), where the annual production tons from 2015 to 2024 were obtained, and thus continue with the adjustment of the model containing four parameters calculated by means of least squares reaching a coefficient of determination of 95%. Then, the Bootstrap method was applied on the model residuals to generate 500 simulations together with the Monte Carlo simulation, which allowed establishing confidence intervals and evaluating different prediction scenarios for crop production in the province of El Oro from 2025 to 2030. The results obtained allow us to observe a behavior that tends to stabilize production, showing limited growth under current conditions.

Keywords: *Ecuadorian cocoa, logistic model, Monte Carlo simulation, production prediction, Bootstrap method*

INTRODUCCIÓN

En Ecuador el cacao representa uno de los productos más importantes que es pilar de la economía del país, donde la provincia de El Oro esta entre los principales sectores productivos de este cultivo, esta provincia destaca por la alta producción de cacao en almendra, que permite la generación de empleo en la zona rural y beneficia la dinámica económica de la cadena productiva del sector, pero la dificultad presentada para realizar planificación estratégica a través del uso de modelos matemáticos de proyección, tomando en cuenta que factores como el cambio climático (1). La inconsistencia del mercado, las malas prácticas agrícolas y otros más influyen en todo sistema agrícola. Bajo este contexto, el estudio realizado tiene como meta crear un modelo de crecimiento que permita predecir la evolución de la producción de cacao en la provincia de El Oro hasta el año 2030, tomando en cuenta el histórico como la incertidumbre inherente a los sistemas agrícolas (2).

La motivación para llevar a cabo esta investigación surgió a partir del notable incremento del precio internacional del cacao, que alcanzó hasta un 300% en los dos últimos años, se analizó la información proporcionada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) (3), la cual evidencia un comportamiento irregular de la producción entre 2015 y 2024, con períodos de estancamiento y picos inusuales de crecimiento, posiblemente vinculados a cambios en la demanda internacional tras la afectación de este cultivo en gran parte de África (4). La evolución de estos datos genera la necesidad de emplear un modelo matemático que no solo explique el

comportamiento observado, sino que también posibilite proyecciones realistas de la producción futura (5).

El objetivo de este estudio realizado es desarrollar un modelo logístico de crecimiento para la producción de cacao en la provincia de El Oro, y el uso de modelo matemático Monte Carlo, este modelo busca predecir la producción futura del cultivo, tomando en cuenta las restricciones naturales del crecimiento agrícola como la incertidumbre en los valores de los factores externos (6). Al usar los datos históricos de producción con técnicas de simulación matemática, se pretende ofrecer una herramienta que oriente la toma de decisiones de los productores, empresarios y políticos involucrados en el sistema agrícola, para así optimizar la inversión, mejorar las políticas públicas y la planificación estratégica en el sector agrícola cacaotero de la provincia de El Oro (7). Ecuador se posiciona como uno de los mayores exportadores mundiales de cacao fino y de aroma, con dos variables predominantes: Nacional Arriba y CCN-51. En 2021, se estimaron exportaciones superiores a las 300 000 toneladas métricas, destacando la importancia económica del cultivo (8).

En Colombia, desarrollaron un modelo de aprendizaje automático para estimar la producción de cacao en el departamento de Santander. Utilizando algoritmos de inteligencia artificial (Machine Learning) como Random Forest y SVM, el estudio logro predecir con alta precisión los rendimientos agrícolas en función de variables climáticas y de manejo técnico (9). Esta investigación destaca la importancia de utilizar modelos matemáticos avanzados en contextos agrícolas; reafirmando que el uso de datos históricos estructurados aplicando técnicas como regresión lineal, arboles de decisión y bosques aleatorios, permite anticipar comportamientos futuros y facilita la toma de decisiones estratégicas en zonas cacaoteras, las cuales mejoran la eficiencia y la estabilidad de la producción cacaotera en la región (10).

En Perú, específicamente en la provincia de Bagua, en la Amazonia, la técnica de simulación Monte Carlo fue aplicada para analizar las características internas del grano de cacao, evaluando su volumen a través de herramientas computacionales en Python donde se aplicaron dos modelos matemáticos codificados. Su trabajo evidencio como los métodos estocásticos permiten capturar la variabilidad natural en cultivos agrícolas, lo que refuerza la necesidad de usar enfoques probabilísticos para proyectar resultados futuros. La aplicación de este tipo de simulación en la agricultura representa una estrategia metodológica que permite evaluar distintos escenarios con base en la incertidumbre inherente al ambiente y al mercado, que permite observar y reflexionar por medio de una matemática más vivencial, aportando una perspectiva más robusta al análisis productivo (11).

Las propiedades químicas y físicas del suelo, en conjunto, condicionan la capacidad productiva de la planta. En el ámbito nacional se realizó el análisis de la relación entre la fertilidad del suelo y la productividad del cacao en la provincia de El Oro, tomando en cuenta el suelo de algunos sectores de los cantones de El Guabo, Machala, Santa Rosa y Pasaje. A través de estudios de laboratorio y correlaciones estadísticas, encontraron que la calidad edáfica es un factor determinante en el rendimiento del cultivo. Estos resultados validan la hipótesis de que la producción cacaotera se encuentran sujeta a un límite natural de crecimiento, lo que justifica el uso de un modelo logístico, ya que este incorpora la noción de capacidad máxima de producción

como una constante dentro de su estructura analítica. Los suelos con mayor valor nutrimentales son los de Machala, que están asociados a su mayor rendimiento promedio tanto para cacao Nacional como cacao de la variedad CCN51 (12).

El cultivo, producción y exportación del cacao constituye un sector importante en los ingresos nacionales, la ubicación permite el crecimiento a gran escala y permite la exportación, llegando al mercado externo con beneficios económicos para el país (13). Luego de investigar la rentabilidad del cultivo del cacao en Ecuador, considerando variables económicas como el área sembrada, los costos de producción y la dinámica de los precios internacionales, El estudio demuestra que el crecimiento del sector no depende únicamente de factores agronómicos, sino también de condiciones económicas y comerciales. Esta visión multidimensional del cultivo refuerza la necesidad de incorporar enfoques que contemplen la variabilidad del entorno, como los modelos estocásticos tipo Monte Carlo los cuales permiten generar predicciones con intervalos de confianza (14).

Hoy en día, las ecuaciones logísticas se aplican ampliamente para simular el crecimiento poblacional en una variedad de campos, principalmente, demografía y ecología (15). Con base en el supuesto de que los factores que regulan el crecimiento dentro del modelo logístico, a saber, la tasa de crecimiento (r) y la capacidad de carga (K), pueden considerarse como las funciones que reflejan la combinación de los parámetros específicos del organismo y del ambiente. Desde una visión teórica se propone una modificación al modelo logístico clásico, integrando parámetros fisiológicos como la fotosíntesis y el almacenamiento celular (16). Aunque los estudios se centraron en condiciones controladas en un laboratorio, los resultados demuestran la flexibilidad del modelo logístico para adaptarse a distintos tipos de procesos biológicos. Esta versatilidad es una magnífica oportunidad para aplicarlo al crecimiento agrícola, especialmente cuando se trabaja con cultivos como el cacao, cuyo rendimiento está condicionado a múltiples factores (17).

En cuanto la simulación Monte Carlo Kummaraka & Srisuradetchai (18) demostraron la utilidad de esta en la Agricultura para modelar riesgos relacionados con el cambio climático y los precios volátiles del mercado. Usando el método Bootstrap, generaron predicciones basadas en múltiples escenarios posibles, lo que permitió construir proyecciones más precisas y confiables, esta investigación respalda la utilización de Monte Carlo con el apoyo de Bootstrap en el estudio que hemos realizado, ya que me permite integrar el componente de incertidumbre en las predicciones agrícolas, ofreciendo así una herramienta útil para el análisis estratégico del rendimiento futuro del cacao (19).

Tomando el fundamento de las investigaciones mencionadas, se justifica realizar este estudio enfocado en combinar un modelo de crecimiento logístico con simulación Monte Carlo, la literatura consultada demuestra que este tipo de aproximación ha sido exitosa en otros contextos agrícolas, permitiendo integrar de forma efectiva tanto la capacidad máxima de producción como la incertidumbre inherente al sistema agrícola. Así el presente estudio busca no solo replicar esta metodología, sino adaptarlas a la realidad productiva de la provincia de El Oro, ofreciendo una herramienta sólida para la planificación estratégica del cultivo de cacao en esta zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, fundamentado en el análisis y modelado de datos numéricos para describir y proyectar el comportamiento de la producción de cacao en la provincia de El Oro, el estudio es de tipo aplicado, con alcance explicativo y predictivo: es aplicado porque responde a una problemática concreta del sector agrícola regional, explicativo porque busca comprender los factores detrás de las variaciones productivas, y predictivo por su interés en estimar escenarios futuros mediante técnicas matemáticas y estadísticas. El diseño es no experimental y longitudinal, basado en la observación y análisis de datos históricos sin manipulación de variables a lo largo de un periodo determinado.

La recolección de datos se realizó mediante revisión documental de fuentes oficiales, extrayendo los registros anuales de producción de cacao (en toneladas) publicados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) para el periodo 2015–2024, esta información, por provenir de una fuente institucional, asegura validez y continuidad temporal, permitiendo su uso directo en el ajuste del modelo propuesto.

Los datos fueron validados mediante una hoja de cálculo en Excel, donde se verificó la consistencia temporal del periodo 2015–2024, la homogeneidad de las unidades (toneladas métricas) y se eliminaron registros duplicados o inconsistentes, se consolidaron únicamente los datos correspondientes a la provincia de El Oro, diferenciando entre productores individuales y asociaciones. Una vez estructurado y depurado el conjunto de datos, se procedió a la formulación del modelo logístico en Python, la validación del modelo se realizó a través de simulación Monte Carlo con Bootstrap, generando 500 réplicas para estimar intervalos de confianza (percentiles 5 %, 50 % y 95 %) y evaluar la precisión de las proyecciones.

La población de estudio corresponde al universo de registros anuales de producción de cacao reportados en la provincia, por lo que no fue necesario un muestreo convencional. Sin embargo, para la simulación se generaron muestras aleatorias mediante re-muestreo (Bootstrap), evaluando así la robustez del modelo ante diferentes escenarios.

RESULTADOS

La recolección de datos para el presente estudios se realizó en el sitio web del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, en el Sistema de Información Pública Agropecuaria, posteriormente a Cifras Agropecuarias, luego a la sección de Estadísticas, Productivo, y descargamos la base de datos del INEC denominada Superficie y producción (3). De este conjunto extraemos la información referente a la producción de cacao en la provincia de El Oro entre 2015 y 2024, organizándola en un archivo de Excel con dos columnas: “Año” y “Producción (toneladas)”.

En la Tabla 1 se presentan los datos de producción en toneladas por año desde 2015 hasta 2024, después de realizar la limpieza del archivo de Excel obtenido del MAGAP, ya que este incluía

información de todas las provincias del país y, para cada provincia, dos tipos de datos: producción total de asociados y producción total individual.

Tabla 1. Producción de cacao El Oro.

Año de producción	Producción Total en Toneladas
2015	10 394
2016	9 630
2017	8 273
2018	4 450
2019	5 930
2020	2 920
2021	4 209
2022	2 609
2023	11 600
2024	14 783

En el 2023 y 2024 hubo un incremento considerable, es importante recalcar que esto sucedió por la reducción de oferta en el continente africano por factores ambientales, lo que ocasiono que la demanda en el mercado aumente y el precio internacional se eleve considerablemente.

Una vez organizada la información, se realizó el análisis exploratorio de los datos, elaborando gráficos de tendencia y calculando las tasas de crecimiento anual para evaluar el comportamiento general de la producción



Figura 1. Tendencia de la producción anual de cacao 2015-2024.

En esta figura 1 se muestra la línea naranja el comportamiento de la producción desde el 2015(en la tabla año 1) al 2024(en la tabla año 10), donde podemos observar que no es lineal, donde del 2015 al 2018 desacelera el crecimiento de la producción y luego acelera y desacelera año a año repitiendo esta secuencia hasta el 2022 (en la tabla año 8), luego de eso experimenta

una aceleración mayor a la habitual en un año , es decir el año 2023 (en tabla año 9); y luego en el 2024 tiene un incremento más acorde al comportamiento presentado hasta el 2022.

Tabla 2. Tasa de crecimiento anual.

Año	Producción (toneladas)	Tasa de crecimiento
2015	10394	
2016	9630	-7,350394458
2017	8273	-14,0913811
2018	4450	-46,21056449
2019	5930	33,25842697
2020	2920	-50,75885329
2021	4209	44,14383562
2022	2609	-38,01378
2023	11600	344,6147949
2024	14783	27,43965517

En esta tabla 2 vemos los porcentajes de crecimiento año a año, donde podemos observar valores negativos y positivos que no muestran una estabilidad y es lo que nos permite aplicar una curva logística para este modelo.

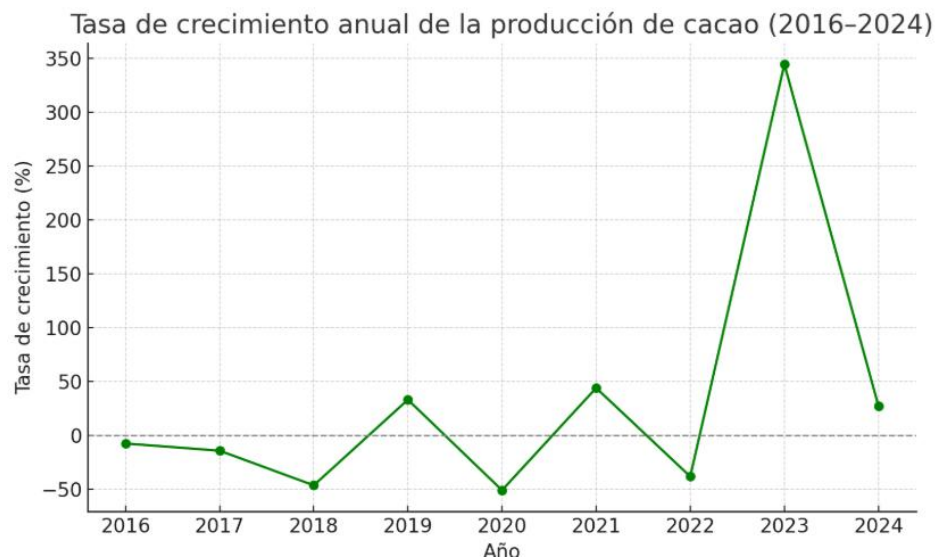


Figura 2. Tasa de crecimiento anual de la producción de cacao entre 2016 y 2024.

En la Figura 3 se muestra una alta variabilidad en la tasa de crecimiento anual del cacao, destacando caídas pronunciadas y un repunte excepcional en 2023, reflejo de factores externos e inestabilidad productiva.

Modelo de crecimiento logístico

A continuación, buscamos un modelo que nos permita modelar una actividad agrícola, por lo que trabajamos con la forma logística clásica:

$$P(t) = \frac{K}{1 + Ae^{-r(t-t_0)}}$$

Donde:

$P(t)$: Producción en el tiempo t .

K : Capacidad máxima de producción

A : Constante de ajuste no lineal

r : Tasa de crecimiento anual.

e : Base del logaritmo natural.

t_0 : Año de inflexión

Los parámetros fueron estimados utilizando el método de mínimos cuadrados, ajustando la curva al conjunto de datos históricos. Este procedimiento fue realizado mediante un script en Python, empleando librerías como NumPy, Scipy y Matplotlib, para optimizar los parámetros y visualizar el ajuste.

Código Python para ajuste de modelo:

Código Python

```
# Paso 1: Importar librerías
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit

# Paso 2: Cargar y filtrar los datos (2015-2024)
# Asegúrate que el archivo esté en el mismo directorio
df = pd.read_excel('produccion_cacao_el_oro_enteros.xlsx')
df.columns = ['Año', 'Producción']
df = df[(df['Año'] >= 2015) & (df['Año'] <=
2024)].reset_index(drop=True)
print(df)
t = df['Año'].values
P = df['Producción'].values

# Paso 3: Definir la función del modelo logístico de 4 parámetros
def logistic4(t, K, A, r, t0):
    return K / (1 + A * np.exp(-r * (t - t0)))

# Paso 4: Estimar parámetros iniciales y establecer límites
(bounds)
p0 = [
    P.max() * 1.1,          # Estimación inicial de K
    (P.max() / P[0]) - 1,  # Estimación inicial de A
    0.3,                   # Estimación inicial de r
    np.mean(t)             # Estimación inicial de t0
]

bounds = (
    [P.max(), 0.0, 0.0, 2015], # Límite inferior para [K, A,
    r, t0]
    [P.max()*5, np.inf, 2.0, 2030] # Límite superior para [K, A,
    r, t0]
)

# Paso 5: Ajustar el modelo usando mínimos cuadrados no lineales
popt, pcov = curve_fit(
    logistic4, t, P,
    p0=p0, bounds=bounds,
    maxfev=20000
)

# Extraer parámetros estimados
K_est, A_est, r_est, t0_est = popt
print(f"Ajuste → K={K_est:.0f}, A={A_est:.2f}, r={r_est:.4f},
t0={t0_est:.1f}")

# Paso 6: Calcular residuos del ajuste
P_hat = logistic4(t, *popt)
```

Los valores de los parámetros luego del ajuste fueron:

K (Capacidad máxima de producción) = 73 915 toneladas

A : Constante de ajuste no lineal = 6.54

r : Tasa de crecimiento anual = 0.0296 por año = 2.96%

t_0 : Año de inflexión= 2030

Estos valores se obtuvieron al definir la ecuación matemática que define el comportamiento logístico, se eligieron valores iniciales basados en los datos reales, donde:

K : Se determino un 1.1 veces la producción máxima (año 2024).

A : La razón entre la producción máxima y el primer residuo del ajuste

r : tasa de crecimiento de 0.3

t_0 : El año medio del rango de datos.

También se limitaron los valores, para no obtener exageraciones en los resultados, así es que:

K : No debe tener valores inferiores a la producción máxima y ni sobrepasar 5 veces la misma.

A y r : Mayores que cero.

t_0 : Entre 2015 y 2030.

Se ajusta con mínimos cuadrados no lineales, usando la función `curve_fit` que se encarga de crear una simulación de la curva con los valores actuales de los parámetros, realiza la suma de los cuadrados de las diferencias entre la simulación y los datos reales, ajusta los parámetros para disminuir la suma de errores, realiza tantas iteraciones hasta que realizar una mejora optima al cual se llama mínimo local , al finalizar la función nos da los valores óptimos de los parámetros y además entrega una matriz que cuantifica la incertidumbre que es importante para su uso en el Bootstrap.

A continuación, se usó simulación Monte Carlo por Bootstrap de residuos para evaluar diferentes escenarios de producción que estén sujetas a condiciones de incertidumbre, Para lo cual se realizó el cálculo de los residuos de cada año (e_t) que es la diferencia entre la producción real de cierto año con la producción proyectada por el modelo, generamos 500 series añadiendo los residuos al ajuste de forma aleatoria, luego con el reajuste a cada serie artificial y predecimos la proyección de los años del 2025 al 2030, al final se toma de las simulaciones hechas los percentiles 5%, 50% y 95%, para tener 3 posibles escenarios de proyección por año.

Código Python para simulación Monte Carlo.

Código Python Parte 1

```
# Paso 1: Importar librerías
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Paso 2: Cargar y preparar datos históricos
df = pd.read_excel('produccion_cacao_el_oro_enteros.xlsx')
df.columns = ['Año', 'Producción']
df = df[(df['Año'] >= 2015) & (df['Año'] <=
2024)].reset_index(drop=True)
t = df['Año'].values
P = df['Producción'].values

# Paso 3: Definir función logística
def logistic4(t, K, A, r, t0):
    return K / (1 + A * np.exp(-r * (t - t0)))

# Paso 4: Cargar resultados del modelo ajustado
data = np.load('fit_logistic4.npz')
popt = data['popt'] # [K, A, r, t0]
cov = data['pcov']
resid = data['resid']
sigma = np.sqrt(np.diag(cov)) # No se usa en este código, pero es
útil si se desea generar incertidumbre paramétrica

# Paso 5: Simulación Monte Carlo con Bootstrap de residuos
N = 500 # Número de simulaciones
t_future = np.arange(2025, 2031)
sim = np.zeros((N, len(t_future)))
```

Código Python Parte 2

```

for j in range(N):
    # 5.1) Remuestreo de residuos
    e_boot = np.random.choice(resid, size=len(resid), replace=True)
    P_boot = logistic4(t, *popt) + e_boot
    # 5.2) Reajuste del modelo sobre la serie simulada
    try:
        pop_t_j, _ = curve_fit(
            logistic4, t, P_boot, p0=popt,
            bounds=(
                [P.max(), 0.0, 0.0, 2015],
                [P.max()*5, np.inf, 2.0, 2030]
            ),
            maxfev=20000
        )
    except RuntimeError:
        pop_t_j = pop_t # Si falla, usar los parámetros originales
    # 5.3) Proyección para años futuros
    sim[j] = logistic4(t_future, *pop_t_j)
# Paso 6: Calcular percentiles (5%, 50%, 95%) por año
p5, p50, p95 = np.percentile(sim, [5, 50, 95], axis=0)
# Paso 7: Guardar resultados en Excel
df_pred = pd.DataFrame({
    'Año': t_future,
    'P5 (toneladas)': p5,
    'Mediana (toneladas)': p50,
    'P95 (toneladas)': p95
})
df_pred.to_excel('predicciones_cacao_2025_2030_bootstrap.xlsx',
index=False)
print("☑ Resultados guardados en
'predicciones_cacao_2025_2030_bootstrap.xlsx'")
# Paso 8: Gráfica de resultados
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.scatter(t, P, color='black', label='Histórico')
plt.plot(t_future, p50, '--', label='Mediana MC', color='blue')
plt.fill_between(t_future, p5, p95, color='skyblue', alpha=0.4,
label='Intervalo 5-95%')
plt.xlabel('Año')
plt.ylabel('Producción (toneladas)')
plt.title('Proyección 2025-2030 (Modelo logístico + Bootstrap)')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Al usar el código, se obtuvieron los siguientes resultados de la proyección de la producción de cacao en la provincia de El Oro para el período 2025–2030, los cuales se presentan en la Tabla 3. Esta tabla resume los valores estimados de producción anual bajo tres escenarios: el límite inferior (percentil 5%), la mediana (percentil 50%) y el límite superior (percentil 95%), permitiendo evaluar la incertidumbre del modelo logístico combinado con simulación Monte Carlo por Bootstrap.

Tabla 3. Predicción de producción futura de cacao (2025-2030).

Año	Producción Media (Toneladas)	Límite Inferior (5%)	Límite Superior (95%)
2025	8 974.88	6 192.46	13 431.96
2026	9 260.00	6 240.60	14 352.23
2027	9 443.46	6 298.35	15 117.98
2028	9 686.90	6 299.45	16 059.89
2029	9 872.07	6 329.32	17 343.92
2030	10 079.99	6 330.30	18 803.66

Esta simulación permitió obtener no solo una estimación puntual, sino también un rango de predicciones con sus respectivos intervalos de confianza, como se observa en la Tabla 3. Se calcularon los percentiles 5 %, 50 % y 95 % para cada año proyectado, generando así un conjunto amplio de posibles resultados que reflejan distintos escenarios. Esta información es especialmente útil para productores, técnicos y tomadores de decisiones involucrados en la cadena de valor del cacao, ya que permite anticiparse a variaciones futuras y planificar estrategias bajo condiciones de incertidumbre.

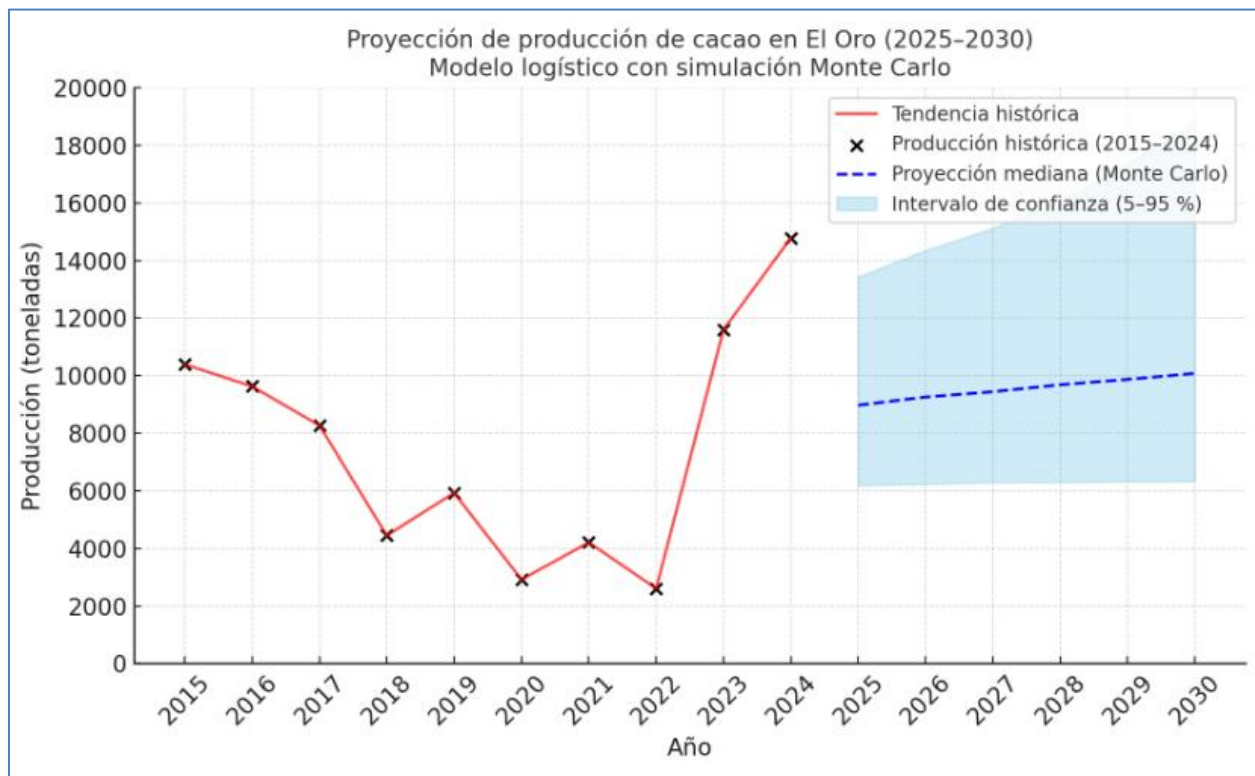


Figura 3. Comportamiento de los datos reales del 2015 al 2024 y de las proyecciones del 2025 hasta el 2030.

La Figura 3 presenta los resultados del ajuste del modelo logístico y la simulación Monte Carlo aplicada a la producción de cacao en la provincia de El Oro, los puntos negros muestran los datos históricos del período 2015–2024, evidenciando una marcada variabilidad interanual y una tendencia no lineal que justifica el uso del modelo logístico, la línea discontinua azul representa la mediana de las proyecciones para el período 2025–2030, mientras que el área sombreada en celeste indica el intervalo de confianza del 5 % al 95 %, generado mediante simulación con remuestreo Bootstrap.

El modelo evidencia una tendencia hacia la estabilización de la producción en los próximos años, aunque aún por debajo de la capacidad máxima teórica estimada en aproximadamente 73.915 toneladas, esta brecha sugiere que, bajo las condiciones actuales, el sistema productivo aún no alcanza su pleno potencial, las proyecciones muestran una posible recuperación sostenida, pero también un alto grado de incertidumbre, especialmente reflejado en los valores máximos del intervalo superior, que podrían alcanzarse solo mediante mejoras estructurales.

Estos hallazgos permiten anticipar los límites naturales del crecimiento si no se introducen innovaciones tecnológicas, mejoras en las prácticas agrícolas y un uso más eficiente de los recursos. Por tanto, el modelo no solo actúa como herramienta de predicción, sino también como una base analítica para fundamentar políticas públicas enfocadas en la sostenibilidad y el aumento del rendimiento del cultivo de cacao en la región.

DISCUSIÓN

El incremento en la producción de cacao en la provincia de El Oro durante 2023 coincide con un contexto internacional marcado por una fuerte caída en la oferta global, principalmente debido a afectaciones climáticas y sanitarias en los principales países exportadores de África, como Ghana y Costa de Marfil, esta escasez elevó significativamente el precio del cacao seco, incentivando una mayor inversión local.

El modelo logístico ajustado en este estudio reflejó adecuadamente esta dinámica, captando el repunte reciente y proyectando una tasa de crecimiento moderada cercana al 3 % anual, la simulación Monte Carlo, basada en la técnica de remuestreo Bootstrap, permitió explorar escenarios futuros para el período 2025–2030, en el caso conservador la producción anual podría mantenerse cerca de las 6 000 toneladas, mientras que en un escenario óptimo podría superar las 18 000 toneladas, este comportamiento proyectado coincide con lo reportado por Tosto A (20), quienes utilizaron un modelo logístico para cultivos tropicales y destacaron su utilidad para anticipar fases de estabilización productiva, esto fortalecen la validez del presente modelo como herramienta predictiva, las diferencias observadas entre escenarios refuerzan la sensibilidad del sistema a factores externos como el clima, las condiciones del mercado, el manejo técnico del cultivo y la expansión de la frontera agrícola, resaltando la necesidad de políticas que fomenten la resiliencia del sector cacaotero.

El modelo estima una capacidad máxima de producción (K) de 73 915 toneladas, lo que indica que el sistema aún se encuentra lejos de alcanzar su potencial sostenible, esta brecha puede atribuirse a limitaciones en el uso de tecnología, escasez de mano de obra calificada,

degradación del suelo y prácticas agrícolas poco eficientes, los resultados son coherentes con investigaciones previas sobre los límites del crecimiento en sistemas agrícolas restringidos por recursos naturales y sociales. Si bien el modelo es útil como herramienta predictiva y de planificación, presenta limitaciones al no incorporar variables agroclimáticas como temperatura, precipitación o fertilización. Aun así, ofrece un marco analítico sólido para orientar decisiones estratégicas e inversiones públicas y privadas que permitan aumentar la productividad y sostenibilidad del cultivo de cacao en la región.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que el modelo logístico constituye una herramienta matemática eficaz para describir y analizar el comportamiento de la producción de cacao en la provincia de El Oro. A través del ajuste a los datos históricos del período 2015–2024, el modelo permitió estimar una capacidad máxima de producción (K) de aproximadamente 73 915 toneladas y una tasa de crecimiento anual moderada del 3 %, estos resultados sugieren que, bajo las condiciones actuales, la provincia aún no alcanza su techo productivo, lo cual representa tanto una limitación como una oportunidad de mejora para el sector agrícola.

La incorporación de la simulación Monte Carlo con Bootstrap sobre los residuos del modelo enriqueció el análisis predictivo, permitiendo establecer un rango de posibles escenarios de producción para el período 2025–2030, evidenciando la utilidad del modelo propuesto para capturar la variabilidad del sistema productivo, la amplitud en los resultados refleja la incertidumbre asociada a factores climáticos, económicos y técnicos.

Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de implementar políticas públicas orientadas a mejorar la productividad del cacao, a través del fortalecimiento de las prácticas agrícolas, la recuperación y manejo sostenible del suelo, la introducción de variedades más resistentes, el uso adecuado de fertilizantes y la optimización del proceso de cosecha, solo mediante estos cambios estructurales se podrá cerrar la brecha existente entre el rendimiento actual y el potencial estimado.

En definitiva, el modelo desarrollado no solo cumple una función analítica, sino que se posiciona como una herramienta estratégica para la toma de decisiones en el ámbito agro productivo, su aplicación puede guiar a productores, autoridades locales y entidades gubernamentales en la planificación de inversiones, el diseño de programas de fomento agrícola y la promoción del desarrollo sostenible del sector cacaotero en la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Contribution of local knowledge in cocoa (*Theobroma cacao* L.) to the well-being of cocoa families in Colombia: a response from the relationship | Agriculture and Human Values [Internet]. [citado 24 de junio de 2025]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10460-024-10623-x>

2. Abad A, Acuña C, Naranjo E. El cacao en la Costa ecuatoriana: estudio de su dimensión cultural y económica. *Estud Gest Rev Int Adm.* 15 de junio de 2020;(7):59-83.
3. Cifras Territoriales [Internet]. [citado 23 de junio de 2025]. Disponible en: <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-territoriales>
4. Romero Vergel AP, Camargo Rodríguez AV, Ramirez OD, Arenas Velilla PA, Gallego AM. A Crop Modelling Strategy to Improve Cacao Quality and Productivity. *Plants.* enero de 2022;11(2):157.
5. Unda SAB, Paz-González A. Indicadores de sostenibilidad sociales y económicos: Caso productores de cacao en El Oro, Ecuador. // *Indicators of sustainability social and economic: Case cocoa farmers of El Oro, Ecuador.* *Cienc UNEMI.* 3 de junio de 2018;11(27):20-9.
6. Kouassi JL, Diby L, Konan D, Kouassi A, Bene Y, Kouamé C. Drivers of cocoa agroforestry adoption by smallholder farmers around the Taï National Park in southwestern Côte d'Ivoire. *Sci Rep.* 31 de agosto de 2023;13(1):14309.
7. Igawa TK, Toledo PM de, Anjos LJS. Climate change could reduce and spatially reconfigure cocoa cultivation in the Brazilian Amazon by 2050. *PLOS ONE.* 18 de enero de 2022;17(1):e0262729.
8. Coll EPC, Dilas-Jiménez JO. Producción y exportación del cacao ecuatoriano y el potencial del cacao fino de aroma. *Qantu Yachay.* 26 de abril de 2022;2(1):08-15.
9. Zuidema PA, Leffelaar PA, Gerritsma W, Mommer L, Anten NPR. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agric Syst.* 1 de mayo de 2005;84(2):195-225.
10. Lapo DJC, Cambo MNR, Sailema WGC, Encarnación PSA. Desarrollo de un modelo predictivo utilizando técnicas de aprendizaje supervisado para detectar la moniliasis en plantas de cacao de la Provincia de Orellana. *Rev Tecnológica - ESPO.* 30 de diciembre de 2023;35(3):46-67.
11. Urbina ROE, Barsallo EC, Gutierrez ARC, Santamaría LMV, Ubillus GAU, Paiva JON. VARIEDAD GEOMÉTRICA DEL CACAO (THEOBROMA CACAO L.) DE BAGUA Y SU MODELACIÓN MATEMÁTICA EN PYTHON. *Epistem Rev Científica.* 11 de junio de 2022;6(1):74-89.
12. Barrezueta-Unda S. Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador. *CienciaUAT.* diciembre de 2019;14(1):155-66.
13. Jaimez RE, Barragan L, Fernández-Niño M, Larreal B OJ, Flores B. Pod Production Dynamics and Pod Size Distribution of *Theobroma cacao* L. Clone CCN 51 in Full Sunlight. *Int J Agron.* 2024;2024(1):4242270.
14. Vélez LS, Carreño LV, Corozo-Quiñónez L, Mora FS, Salas-Macías C, Monserrate GP. Recursos genéticos de cacao tipo Nacional en Ecuador: una revisión sistemática. *Cienc Tecnol.* 27 de diciembre de 2022;15(2):30-42.
15. Choi J, Chen J, Harring JR. Logistic Growth Modeling with Markov Chain Monte Carlo Estimation. *J Mod Appl Stat Methods [Internet].* 1 de mayo de 2019 [citado 24 de junio de 2025];18. Disponible en: <https://jmasm.com/index.php/jmasm/article/view/1032>

16. Moreno-Zambrano M, Grimbs S, Ullrich MS, Hütt MT. A mathematical model of cocoa bean fermentation. *R Soc Open Sci.* 17 de octubre de 2018;5(10):180964.
17. Candelaria Martínez B, Ruiz Rosado O, Gallardo López F, Pérez Hernández P, Martínez Becerra Á, Vargas Villamil L. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Trop Subtrop Agroecosystems.* diciembre de 2011;14(3):999-1010.
18. Kummaraka U, Srisuradetchai P. Monte Carlo Dropout Neural Networks for Forecasting Sinusoidal Time Series: Performance Evaluation and Uncertainty Quantification. *Appl Sci.* enero de 2025;15(8):4363.
19. Crescenzo AD, Paraggio P, Román-Román P, Torres-Ruiz F. Applications of the multi-sigmoidal deterministic and stochastic logistic models for plant dynamics. *Appl Math Model.* abril de 2021;92:884-904.
20. Tosto A, Morales A, Rahn E, Evers JB, Zuidema PA, Anten NPR. Simulating cocoa production: A review of modelling approaches and gaps. *Agric Syst.* 1 de marzo de 2023;206:103614.