

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI**

**POSGRADO**



**MAESTRÍA EN ESTADÍSTICA APLICADA**

**“Análisis y Pronóstico del Precio Promedio del Cacao en el Mercado Local de Ecuador entre los años 2012 y 2024 según Tipos de Cacao y Provincias Productoras”**

Trabajo de titulación previa la obtención del  
Título de Magister en Estadística Aplicada

Autor: Lenin Antonio Vera Macias

Tutor: Oswaldo Eduardo Cabezas Gottschalk

Tulcán, 2025

## CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que el maestrante Vera Macías Lenin Antonio con el número de cédula 1311713570 ha elaborado el trabajo de titulación: “Análisis y Pronóstico del Precio Promedio del Cacao en el Mercado Local de Ecuador entre los años 2012 y 2024 según Tipos de Cacao y Provincias Productoras”. Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuestas en la Codificación del Reglamento de Régimen Académico y de Estudiantes de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi con RESOLUCIÓN No. 171-CSUP-2023, por lo tanto, autorizo su presentación para la sustentación respectiva.



f.....

Msc. Eduardo Cabezas

**TUTOR**

Tulcán, diciembre de 2025

## AUTORÍA DE TRABAJO

El presente trabajo de titulación constituye un requisito previo para la obtención del título de Magister en Estadística Aplicada.

Yo, Vera Macías Lenin Antonio con cédula de identidad número 1311713570 declaro: que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.



Vera Macías Lenin Antonio

**AUTOR**

Tulcán, diciembre de 2025

## ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Vera Macías Lenin Antonio declaro ser autor/a de los criterios emitidos en el trabajo de titulación: “Análisis Integral de la Dinámica y Tendencias del Precio del Cacao en Ecuador” y eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.



Vera Macías Lenin Antonio

**AUTOR**

Tulcán, diciembre de 2025

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios, cuya guía y bendiciones han sido fundamentales en este camino, llenándome de fortaleza y sabiduría para enfrentar cada desafío.

A mi esposa, por su amor incondicional, paciencia y aliento constante, que han sido el motor que me impulsa a seguir adelante. A mi hija, por ser mi mayor inspiración y recordarme cada día la importancia de esforzarme por un futuro mejor.

A mi familia, por sus valores, apoyo y palabras de ánimo que me han sostenido en todo momento.

A mis profesores y colegas, quienes con su conocimiento y generosidad han enriquecido este proceso. Finalmente, a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A Dios, fuente de mi fortaleza y guía en cada paso de mi vida, quien con su infinita gracia me ha permitido superar los retos y alcanzar este logro.

A mi esposa, cuyo amor, paciencia y apoyo incondicional han sido mi refugio y motivación constante. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mi hija, la luz de mi vida, por recordarme cada día el verdadero significado de la esperanza y la felicidad.

A mi familia, por su cariño, enseñanzas y valores que me han moldeado como persona. Este trabajo es también suyo.

## ÍNDICE

ABSTRACT .....	xi
RESUMEN .....	xii
CAPÍTULO I .....	1
PROBLEMA .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Hipótesis.....	2
1.3. Objetivos de investigación .....	3
1.3.1. <i>Objetivo General</i> .....	3
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.4. Justificación.....	3
CAPÍTULO II .....	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
2.1. Antecedentes de la investigación .....	6
2.2. Marco teórico .....	8
2.2.1. <i>Equilibrio de Oferta y Demanda</i> .....	8
CAPÍTULO III.....	20
METODOLOGÍA .....	20
3.1. Descripción del área de estudio/grupo de estudio .....	20
Grupo de estudio: .....	20
3.2. Enfoque y tipo de investigación .....	21
3.3. Definición y operacionalización de variables .....	22
<i>Sistema Nacional de Información del Ministerio de Agricultura y Ganadería</i> (MAG). .....	22
3.4. Procedimientos .....	25
CAPÍTULO IV .....	31

RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
CAPÍTULO V .....	55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	55
Conclusiones .....	55
Recomendaciones .....	56
REFERENCIAS.....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Definición operacional de las variables utilizadas en el estudio sobre el precio del cacao en Ecuador (2012–2024) .....	22
<b>Tabla 2</b> Operacionalización de variable independiente para pronosticar el precio promedio de cacao en el mercado local de Ecuador .....	23
<b>Tabla 3</b> Operacionalización de variable dependiente .....	24
<b>Tabla 4</b> Coeficiente de correlación de las variables de estudio.....	37
<b>Tabla 5</b> Análisis del coeficiente de correlación .....	38
<b>Tabla 6</b> Análisis de la influencia de las variables en el modelo Híbrido ARIMAX + XGBoost .....	39
<b>Tabla 7</b> Prueba de Ljung-Box. residuos Híbrido ARIMAX + XGBoost .....	43
<b>Tabla 8</b> Análisis de la influencia de las variables en el modelo ARIMAX y SARIMAX .....	43
<b>Tabla 9</b> Métricas de mejores parámetros en modelo ARIMAX.....	44
<b>Tabla 10</b> Comparación de modelos SARIMAX .....	44
<b>Tabla 11</b> Prueba de Ljung-Box. residuos SARIMAX .....	46
<b>Tabla 12</b> Híbrido ARIMAX + RANDOM FOREST .....	48
<b>Tabla 13</b> Prueba de Ljung-Box. residuos Híbrido ARIMAX + RF .....	50
<b>Tabla 14</b> Resultados del modelo de árbol de regresión para la predicción del Precio Quintal Promedio .....	51
<b>Tabla 15</b> Importancia de variable según Random Forest.....	52
<b>Tabla 16</b> Resumen de las métricas de importancia para cada variable Modelo XGBoost .....	52
<b>Tabla 17</b> Resumen Comparativo de modelos aplicados .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Distribución geográfica de las provincias productoras de cacao .....	21
<b>Figura 2</b> Series de tiempo, para cada tipo de cacao periodo (01 / 01/2012 – 01/01/2025).....	31
<b>Figura 3</b> Evolución del precio por tipo de cacao (USD quintal) periodo (01/01/2012– 01/ 01/2025).....	32
<b>Figura 4</b> Precio promedio de cacao (USD) por provincia y producto periodo (01/01/2012–01/ 01/2025) .....	33
<b>Figura 5</b> Total, de producción por provincia y tipo de cacao .....	35
<b>Figura 6</b> Coeficiente de correlación de la variable precio internacional de tonelada métrica de cacao y precio quintal promedio en Ecuador .....	37
<b>Figura 7</b> Errores en el tiempo de los 3 mejores modelos según las mejores métricas .....	39
<b>Figura 8</b> Importancia de las variables predictoras con el modelo híbrido ARIMAX + XGBoost .....	40
<b>Figura 9</b> Predicción del modelo ARIMAX + XGBoost .....	42
<b>Figura 10</b> Análisis residual del modelo híbrido ARIMAX + XGBoost.....	43
<b>Figura 11</b> Predicción del diseño SARIMAX .....	45
<b>Figura 12</b> Análisis residual del modelo SARIMAX.....	46
<b>Figura 13</b> Importancia de variables el modelo híbrido ARIMAX + RANDOM FOREST .....	48
<b>Figura 14</b> Comparación de valores reales y predicción del modelo híbrido ARIMAX + RANDOM FOREST .....	49
<b>Figura 15</b> Análisis residual del modelo híbrido arimax + random forest .....	50
<b>Figura 16</b> Árbol de decisión para el precio del quintal promedio .....	50
<b>Figura 17</b> Importancia de las variables en modelo Random Forest .....	51
<b>Figura 18</b> Importancia de variables según modelo XGBoost .....	53

## ABSTRACT

This research analyzes the behavior of the average price of cocoa at collection centers in Ecuador during the period 2012–2024, considering cocoa types and producing provinces. Official data for CCN 51, fine aroma, and mixed cocoa (wet and dry) were used, organized by year, month, and province. Through exploratory analysis in R, with descriptive statistics and graphs, patterns of variation and significant differences between regions and cocoa types were identified. Econometric and machine learning models based on time series were developed for forecasting. The price per quintal was the dependent variable, and exogenous variables such as temperature, precipitation, and international price per ton were incorporated. The data were divided into training (all months except the last four) and test (last four months). The hybrid ARIMAX + XGBoost model was estimated by fitting an ARIMAX model and modeling its residuals using XGBoost with a regression objective, a learning rate of 0.1, a maximum depth of 6, 80% sampling, and 100 iterations. The evaluation was performed using RMSE, MAE, and MAPE. The results show that fine aroma dry cocoa registers the highest prices, while CCN 51 and mixed cocoa present lower prices. Provinces such as Los Ríos and Guayas contribute approximately 330,000 tons annually, supporting some 400,000 people. Prices ranged between USD 67 (2017) and USD 223 (2024). Internationally, the price exceeded USD 10,000 per ton in 2024 due to declining production in Ivory Coast and Ghana caused by climatic and phytosanitary factors. The ARIMAX + XGBoost hybrid model was the most accurate (RMSE: 7.25; MAE: 5.27; MAPE: 1.77%).

**Keywords:** cocoa, prices, forecast, ARIMAX, XGBoost, time series, Ecuador

## RESUMEN

La investigación analiza el comportamiento del precio promedio del cacao en los centros de acopio del Ecuador durante el período 2012–2024, considerando los tipos de cacao y las provincias productoras. Se utilizaron datos oficiales de cacao CCN 51, fino de aroma y mezclado (en baba y seco), organizados por año, mes y provincia. Mediante un análisis exploratorio en R, con estadísticas descriptivas y gráficos, se identificaron patrones de variación y diferencias significativas entre regiones y tipos de cacao. Para el pronóstico se desarrollaron modelos econométricos y de aprendizaje automático basados en series temporales. El precio por quintal fue la variable dependiente y se incorporaron variables exógenas como temperatura, precipitación y precio internacional por tonelada. Los datos se dividieron en entrenamiento (todos los meses excepto los últimos cuatro) y prueba (últimos cuatro meses). El modelo híbrido ARIMAX + XGBoost se estimó ajustando un ARIMAX y modelando sus residuos mediante XGBoost con objetivo de regresión, tasa de aprendizaje de 0.1, profundidad máxima de 6, muestreo del 80% y 100 iteraciones. La evaluación se realizó mediante RMSE, MAE y MAPE. Los resultados muestran que el cacao fino de aroma seco registra los precios más altos, mientras que el CCN 51 y el cacao mezclado presentan menores cotizaciones. Provincias como Los Ríos y Guayas aportan cerca de 330 000 toneladas anuales, sustentando a unas 400 000 personas. Los precios oscilaron entre 67 USD (2017) y 223 USD (2024). A nivel internacional, la cotización superó los 10 000 USD por tonelada en 2024 por la caída productiva en Costa de Marfil y Ghana debido a factores climáticos y fitosanitarios. El modelo híbrido ARIMAX + XGBoost fue el más preciso (RMSE: 7.25; MAE: 5.27; MAPE: 1.77%).

**Palabras clave:** cacao, precios, pronóstico, ARIMAX, XGBoost, series temporales, Ecuador

# CAPÍTULO I

## PROBLEMA

### 1.1. Planteamiento del problema

La volatilidad de los precios del cacao se enmarca en un contexto global caracterizado por múltiples desafíos estructurales y coyunturales que afectan tanto a productores como a comercializadores y consumidores. Este fenómeno es impulsado por factores climáticos, que provocan cambios importantes en la oferta y los movimientos en las preferencias de los consumidores que modifica la demanda entre otros eventos que generan incertidumbre en el precio de este producto

En África occidental, que concentra la mayor parte de la producción mundial, las condiciones climáticas adversas como lluvias extremas y sequías han exacerbado problemas como la propagación de enfermedades, entre ellas la de la vaina negra y el virus de los brotes hinchados. Estos factores han reducido significativamente los rendimientos agrícolas, además hay que sumar el envejecimiento de las plantaciones. Adicionalmente, los bajos salarios de los agricultores en Costa de Marfil y Ghana han limitado su capacidad para invertir en prácticas agrícolas que mejoren la resiliencia de sus cultivos, perpetuando la disminución de la producción (Anecacao, 2024).

En Ecuador, aunque los productores han experimentado un beneficio directo debido al aumento de los precios para el 2024, con incrementos en el pago por quintal de \$150 a \$500, este contexto también presenta riesgos. La expansión de áreas de cultivo para aprovechar los altos precios requiere de nuevas inversiones que tardan al menos tres años en materializarse. Si no se gestionan adecuadamente estas inversiones a nivel global, podrían llevar a una sobreproducción en el futuro y a una caída de precios por debajo de los costos de producción (Cámara de Comercio de Quito, 2024).

Por su parte, los fabricantes de chocolate enfrentan una creciente presión sobre el aumento de los costos de las materias primas como por ejemplo almendras de cacao, y varios insumos además la transición hacia prácticas agrícolas sostenibles y éticas han incrementado los costos de producción, afectando tanto a los productores como

a los comercializadores. En 2024, el precio internacional del cacao se ha incrementado más de un 73 %, lo que genera preocupación por una posible escasez en el suministro global (Santiago, 2024).

Es importante mencionar que, la estructura de valor agregado en el mercado internacional es desigual. Mientras que el precio final del chocolate beneficia mayormente a fabricantes y minoristas, los productores reciben una porción mínima del valor generado. En la Unión Europea, que representa el mayor mercado consumidor, sólo siete centavos de cada euro pagado por una barra de chocolate llegan al productor, mientras que 80 centavos son absorbidos por intermediarios y minoristas (Becker, 2024).

Finalmente, la volatilidad de precios también afecta la liquidez de los exportadores, quienes han tenido que renegociar contratos debido a diferencias extremas entre los precios pactados y los precios actuales. Algunos exportadores incluso abandonaron el negocio, aunque quienes permanecieron han comenzado a adaptarse a este entorno cambiante (Mendoza, 2024).

La fluctuación de los precios representa uno de los principales desafíos para los productores de cacao. La elevada incertidumbre complica la planificación de la producción y la administración de las finanzas de los agricultores. Asegurar que los cacao cultores reciban precios justos y estables por su cosecha es esencial para garantizar la sostenibilidad de toda la cadena de suministro (luckerchocolate, 2024).

¿Cómo incide la volatilidad del precio internacional del cacao, originada por factores climáticos, productivos y comerciales, en el precio de los mercados locales, la estabilidad económica de los productores ecuatorianos, la sostenibilidad de la cadena de suministro y las decisiones de inversión en el sector cacaotero?

## **1.2. Hipótesis**

El precio promedio local del cacao en Ecuador entre 2012 y 2024 está influenciado por factores como la temperatura, la precipitación y el precio internacional de la tonelada métrica de cacao. Se espera que estos factores contribuyan a explicar la

variabilidad de los precios de exportación y permitan realizar predicciones precisas sobre las fluctuaciones de los precios futuros del cacao.

**Hipótesis nula:** Los factores climáticos (temperatura y precipitación) y el precio internacional de la tonelada de cacao no tienen efecto significativo sobre el precio promedio local del cacao en Ecuador (2012–2024).

**Hipótesis alternativa:** Los factores climáticos y el precio internacional sí influyen significativamente en el precio promedio local del cacao (2012–2024).

### **1.3. Objetivos de investigación**

#### *1.3.1. Objetivo General*

- Analizar el comportamiento del precio promedio de cacao en centros de acopio de Ecuador, considerando tipos de cacao y provincia, durante el período comprendido entre 2012 y 2024.

#### *1.3.2. Objetivos Específicos*

- Determinar la incidencia de los precios promedio según el tipo de cacao (Cacao CCN 51 en Baba, Cacao en Baba fino de aroma, Cacao en Baba Mezclado, Cacao CCN 51 Seco, Cacao seco fino de aroma, Cacao Seco mezclado) en el mercado local desde el año 2012 al 2024.
- Analizar los patrones y tendencias del precio del cacao en Ecuador durante el período 2012-2024, considerando la variación del precio promedio en las provincias registradas en el Sistema de Información de Productos Agroindustriales.
- Pronosticar el precio promedio de cacao en el mercado local de Ecuador, utilizando datos históricos del período 2012-2024, mediante el desarrollo de modelos econométricos y de aprendizaje automático, incluyendo enfoque multivariante híbridos, para identificar el modelo con mayor precisión predictiva.

### **1.4. Justificación**

La agricultura se encuentra entre las actividades productivas que más recursos genera en Ecuador, el sector cacaotero ha fortalecido significativamente su participación

dentro del comercio exterior ecuatoriano, no solo por el crecimiento en el volumen exportado, sino también por el valor agregado de sus productos transformados. En 2024, Ecuador exportó 471.157 toneladas de cacao, lo que representó un aumento del 14,71 % respecto al año anterior, generando ingresos superiores a los USD 1.600 millones (Oriente Ecuador, 2025).

A comienzos de 2025, el cacao ecuatoriano logró un récord sin precedentes al posicionarse como el producto más exportado del país, superando por primera vez en más de seis décadas al banano y a los minerales. De acuerdo con el Banco Central del Ecuador (BCE), entre enero y febrero las exportaciones de cacao generaron USD 956 millones, lo que representa un incremento del 194 % en comparación con el mismo periodo del año anterior (López, 2025).

A pesar de la significativa importancia del cacao en el mercado mundial y su considerable contribución a los ingresos en divisas del Ecuador, así como el extenso porcentaje de suelo agrícola dedicado a su cultivo, los productores enfrentan condiciones socioeconómicas desfavorables (Parada y Veloz, 2021).

Ecuador es país líder en la producción de cacao de excelencia, el cacao fino de aroma, con un volumen de cerca de 200,000 toneladas / año, producto cuya demanda global ha crecido generando una demanda insatisfecha de cerca 120,000 toneladas / año. Cerca de 100 mil familias de pequeños productores están involucradas en la cadena de suministro (99% del total); el 60% no tiene la propiedad de la tierra y mantiene bajos niveles de productividad (5 quintales / ha), el 80% usa productos agroquímicos y solo unos pocos se reúnen en asociaciones (Comité Europeo para la Formación y la Agricultura [CEFA], 2024).

El proceso de comercialización se presenta cuando el agricultor acude a los centros poblados más cercanos a vender su producto a intermediarios, quienes acopian el cacao en lotes más grandes para entregarlo al exportador. Otra forma de realizar este proceso, es cuando el agricultor generalmente tiene una producción mayor, vende su producto directamente al exportador (Rosado et al., 2022).

Por otra parte, Pérez (2023) menciona que la calidad del cacao depende en gran medida de la etapa de fermentación, que es un proceso crucial que transforma los

granos frescos en un producto aromático y de sabor intenso, esencial para la elaboración del chocolate. Sin embargo, diversos factores pueden afectar el desarrollo adecuado de la fermentación, ocasionando problemas que impactan negativamente la calidad del cacao. Aunque el boom petrolero de los años setenta y posteriores cambió la dinámica económica de Ecuador, el cacao ha seguido siendo una parte importante de su economía a lo largo de los años, y los esfuerzos por promover su producción y exportación continúan siendo relevantes para el desarrollo económico del país (Míguez, 2021).

Esta investigación se enmarca en la línea de investigación “Aplicación de la Estadística en la solución de problemas del entorno”, dado que analiza cómo factores climáticos, productivos y comerciales influyen en la dinámica del precio de comercialización del cacao en mercados locales, la estabilidad económica de los agricultores y la sostenibilidad de la cadena cacaotera. Además, está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) especialmente los ODS 2 (Hambre Cero), 8 (Trabajo Decente), 12 (Producción Responsable) y 13 (Cambio Climático) al buscar soluciones para mejorar la productividad, fomentar cadenas sostenibles y considerar impactos climáticos.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

El *Theobroma cacao* L. es un cultivo emblemático en Ecuador, donde su producción se ha consolidado no solo por su riqueza biológica, sino también por su importancia económica y social. Según Avadí et al. (2023), la cadena productiva de cacao ecuatoriano comprende subcadenas muy distintas: algunas orientadas al volumen (utilizando variedades como CCN-51) y otras enfocadas en la calidad (cacao fino y de aroma), lo que refleja diversidad en prácticas agrícolas y estrategias de comercialización.

En ese sentido, la sostenibilidad ha cobrado relevancia en la cadena del cacao. Moreno et al. (2023) proponen estrategias para fortalecer la gobernanza y coordinación entre actores (productores, intermediarios, exportadores) para promover un desarrollo más sostenible de la cadena de valor del cacao en Ecuador. Además, la adopción de prácticas agrícolas sostenibles ha sido estudiada por diversos investigadores, quienes encuentran que factores de la cadena de valor, como el acceso a mercados premium y la certificación, influyen significativamente en que los agricultores implementen técnicas más ecológicas como la agroforestería, manejo postcosecha (Tennhardt et al., 2023).

El componente institucional y comercial es también muy relevante. García et al. (2021) analizan la resiliencia de distintos actores en la cadena productiva del cacao ecuatoriano, identificando que los retos deben abordarse mediante la mejora de la asociatividad, la investigación y la optimización del mercado nacional e internacional. Por su parte, Cambisaca et al. (2023) estudian la competitividad de las exportaciones de cacao entre 2015 y 2020 y evidencian que Ecuador enfrenta desafíos para mantener su posición frente a otros países latinoamericanos, pese al reconocimiento de su cacao fino.

La calidad del grano es un tema clave. Zurita et al. (2023) exploran la variedad de cacao fino de aroma en la zona de El Pangui (provincia de Loja), sugiriendo que estos

granos son aptos para la producción de chocolate gourmet, lo que puede añadir valor agregado para los productores y exportadores.

En cuanto a la vulnerabilidad ante crisis, Zambrano et al. (2024) investigaron los impactos de la pandemia de COVID-19 en la cadena de cacao en Ecuador, mostrando que los pequeños agricultores y los intermediarios vivieron efectos diferentes y que estas diferencias pueden afectar la oferta y la capacidad de exportación con efectos de largo plazo.

Diversos estudios recientes evidencian que el cultivo de cacao continúa siendo un motor fundamental para la economía familiar en Ecuador, especialmente para pequeños productores. En este sentido, Mendoza et al. (2022) señalan que, incluso durante la pandemia, la cadena de exportación del cacao mantuvo su dinamismo y permitió que numerosas familias productoras conservaran ingresos estables pese a la crisis económica global. De manera similar, Mora (2023) demuestran que las fincas cacaoteras sostenibles del cantón Pueblo Viejo generan beneficios directos para las familias productoras al mejorar su gestión económica y su productividad. Además, Caicedo et al. (2023) concluyen que las prácticas agroecológicas aplicadas en plantaciones de cacao en la Amazonía ecuatoriana incrementan la eficiencia económica y contribuyen al bienestar de los hogares rurales. En conjunto, estos estudios confirman que el cacao, tanto por su valor comercial como por la sostenibilidad de su cultivo, impacta positivamente en la calidad de vida de miles de familias ecuatorianas.

## **2.2. Marco teórico**

### *2.2.1. Equilibrio de Oferta y Demanda*

Estudios recientes muestran que los desplazamientos de la curva de oferta agrícola no solo responden a cambios en el precio del bien, sino también a fenómenos estructurales vinculados a los insumos. Según Niu et al, (2024), los agricultores moderan su uso de fertilizantes cuando los costos aumentan, lo que limita la expansión de la oferta más allá de cierto punto óptimo. En paralelo, Dimkpa et al. (2023) enfatizan que los altos precios o la falta de acceso a fertilizantes degradan la salud del suelo, reduciendo los rendimientos y, por tanto, la oferta potencial. En el caso específico del cacao, Olarte et al. (2025) reportan que desequilibrios en precios internacionales elevan los costos de producción, reducen la capacidad exportadora de los productores más pequeños y generan caída en la oferta global de cacao.

Así mismo, estudios evidencian que los efectos climáticos, como sequías, lluvias intensas o variabilidad de temperatura, tienen un impacto significativo en la oferta agrícola. Esto se evidencia en pequeños agricultores de cadenas productivas globales experimenten fuertes pérdidas cuando ocurren huracanes o inundaciones, lo que reduce su producción y limita la oferta general Thompson et al. (2023). En el sur de África, el fenómeno de El Niño ha sido directamente asociado con descensos en los rendimientos de maíz y otros cultivos, presionando la oferta local Mugiyo et al., (2023).

En zonas asiáticas como Tailandia, la variabilidad climática ha demostrado reducir no solo el rendimiento de los cultivos, sino también los ingresos de los productores Al Mamun et al., (2023). Asimismo, en Bangladesh, la variabilidad temporal de precipitaciones provoca caídas en la producción de arroz, sugiriendo desplazamientos en la oferta. En los Andes ecuatorianos, los cultivos tradicionales sufren los efectos del cambio climático, lo que podría traducirse en una oferta agrícola más volátil o reducida (Serrano et al., 2025).

### **Movimientos de la Oferta**

Los movimientos a lo largo de la curva de oferta responden únicamente a cambios en el precio del bien. Sin embargo, cuando cambian factores distintos al precio, como los costos de producción, la tecnología schks o los impuestos, la curva de oferta se desplaza y dependiendo del tipo de schks estos desplazamientos pueden ser positivos

o negativos. En este caso, si los costos de insumos bajan, los productores pueden ofrecer más a cada precio, desplazando la oferta hacia la derecha.

Según Mankiw (2012), si ocurre algo que altera la cantidad ofrecida de un bien a cada precio, decimos que la curva de oferta se desplaza (p. 91). Del mismo modo, Pindyck y Rubinfeld (2009), explican que una subida del precio puede permitir a las empresas aumentar la producción y también pueden expandir la producción a largo plazo ampliando sus plantas (p. 25). Así, los factores que pueden causar desplazamientos en la oferta incluyen los cambios tecnológicos, los impuestos o subsidios, el número de vendedores en el mercado y las expectativas sobre el futuro.

### **Movimientos de la Demanda**

Mankiw (2012) señala que cuando se producen cambios en variables que no sea el precio del propio bien provocan un cambio en la cantidad demandada a cada nivel de precio, por lo tanto, la curva de demanda se desplaza positiva o negativamente dependiendo del shock (p. 86). Entre los factores que alteran la demanda se encuentran: los cambios en la renta o ingreso de los consumidores (que afectan la demanda de bienes normales o inferiores), los gustos o preferencias de los demandantes, el número de compradores, los precios de los bienes sustitutos o complementarios y las expectativas.

Pindyck y Rubinfeld (2009), destacan que entender cómo varían las curvas de oferta y demanda “nos ayuda a comprender por qué y cómo varían los precios y qué ocurre cuando interviene el Estado en un mercado” (p. 24). Esto demuestra la utilidad del análisis de oferta y demanda no solo para comprender fenómenos económicos simples, sino también para prever los efectos de políticas públicas y shocks económicos.

En ese sentido, el análisis moderno reconoce que cambios estructurales como los costos de producción, la digitalización o la sostenibilidad también influyen significativamente en la oferta. En este contexto, Bermúdez et al., (2022) evidencian que los estándares de sostenibilidad en la producción de cacao pueden afectar los precios al productor y fomentar transparencia en la cadena, lo cual impacta directamente la oferta. Konaté et al., (2025) han mostrado cómo los costos de

oportunidad en distintas zonas ecológicas afectan la decisión de producción, limitando la oferta potencial. Por otro lado, la innovación tecnológica digital como el uso de big data a impulsado la productividad agrícola y reduce costos, lo que puede expandir la capacidad de oferta (Gong & Tang, 2025, p. 5).

En cuanto a la formación del precio en el mercado, Ahene, et al. (2022) han analizado cómo los precios al productor en Ghana se basan en referencias internacionales y mercados de futuros, lo que conecta directamente con la dependencia del precio mundial. Finalmente, el estudio de Zambrano et al., (2024) sobre el cluster del cacao en Ecuador demuestra cómo las estructuras locales de producción y comercialización condicionan la oferta y los precios internos.

### **Fijación y Formación de Precios en el Mercado**

La formación del precio en los mercados agrícolas no solo depende de la interacción entre oferta y demanda, sino también de factores estructurales propios del sector. En el caso del cacao, la cotización internacional constituye el principal referente para los países productores, ya que los precios locales se ajustan en función de las variaciones del mercado global (World Bank, 2024). Además, la calidad del grano influye significativamente en el valor final, debido a que características como fermentación, humedad, impurezas y aroma determinan la aceptación en la industria chocolatera internacional, lo cual es destacado por la International Cocoa Organization ICCO (2024). A estos elementos se suman los costos de producción y logística, que incluyen mano de obra, insumos agrícolas, transporte y almacenamiento, los cuales ejercen presión sobre los precios pagados al productor.

#### ***2.2.2. Series de tiempo***

El análisis de series temporales resulta fundamental para estudiar la evolución del precio del cacao, ya que los datos se registran de manera cronológica y reflejan la dinámica del mercado a través del tiempo. Este tipo de análisis permite observar patrones, fluctuaciones y dependencias entre periodos consecutivos, lo cual es indispensable para comprender el comportamiento de variables económicas y agrícolas que se actualizan de forma continua y presentan alta variabilidad (Fu, 2011). En mercados como el del cacao, donde intervienen factores internos producción, cosecha, calidad y externos cotizaciones internacionales, demanda de la industria chocolatera, las series temporales ofrecen una herramienta sólida para su estudio.

Dentro de este análisis, la estacionariedad constituye un elemento esencial, ya que muchos modelos requieren que la serie mantenga propiedades estables en el tiempo. Para alcanzar esta condición pueden aplicarse transformaciones como la diferenciación, el ajuste de tendencias o la estabilización de la varianza. Se reconoce principalmente la estacionariedad estricta y la de segundo orden; esta última es la más utilizada en aplicaciones económicas. Sin embargo, en los precios agrícolas es habitual encontrar tendencias prolongadas, variaciones abruptas o quiebres estructurales que dificultan su tratamiento (Maronna et al., 2018).

En el caso del cacao, las perturbaciones inesperadas son especialmente relevantes, pues los precios pueden verse afectados por fenómenos climáticos, problemas logísticos, tensiones geopolíticas, enfermedades en cultivos o movimientos especulativos en los mercados internacionales. Estos eventos alteran la estructura temporal y pueden deteriorar la precisión de los modelos si no se abordan adecuadamente. Como señalan Maronna et al., (2018), la detección y corrección de valores atípicos en series con dependencia temporal implica un reto mayor que en datos independientes, por lo que requiere métodos específicos.

### **Componentes de una serie**

Las series temporales están conformadas por estructuras que permiten comprender su comportamiento y modelar adecuadamente su evolución. En términos generales, se reconoce que toda serie puede descomponerse en patrones sistemáticos y en variaciones residuales que juntos explican la dinámica observada. Hyndman & Athanasopoulos (2021) señalan que la tendencia, la estacionalidad, los ciclos y los movimientos irregulares constituyen los pilares fundamentales para el análisis y pronóstico, pues permiten identificar la dirección general de los datos, las repeticiones periódicas, las fluctuaciones económicas y las perturbaciones aleatorias, respectivamente.

En la literatura reciente, la tendencia es entendida como una estructura de cambio persistente a lo largo del tiempo que puede manifestarse de forma suave o mediante transiciones más complejas. Diversos estudios han explorado la necesidad de conceptualizar la tendencia desde perspectivas multidisciplinarias debido a su papel central en la predicción y filtrado de señales (Alexandrov et al., 2012). Por otra parte, la estacionalidad ha sido abordada no solo como una repetición periódica, sino también como un fenómeno dinámico capaz de cambiar en magnitud y

comportamiento. En modelos modernos con volatilidad estacional (modelos GARCH estacionales), los autores han incorporado estacionalidad tanto en la media como en la varianza, especialmente en contextos heterocedásticos, lo que permite capturar variaciones más realistas en series económicas o de producción (Makogin, et al., 2021).

El análisis de patrones estacionales es clave en sectores donde las fluctuaciones cíclicas se repiten de manera predecible. La literatura reconoce que estos patrones influyen de manera significativa en la planificación empresarial y la gestión de inventarios (Chatfield, 2003). Es importante mencionar que, en este marco, se han desarrollado métodos como el enfoque estacional multiplicativo, el cual resulta útil cuando la variación estacional guarda proporción con el nivel de la serie. En esta línea, (Fair, 2019) evidencian que la estimación de índices estacionales multiplicativos dentro de modelos ETS permite obtener pronósticos más precisos en series económicas donde los patrones cíclicos se intensifican o disminuyen conforme crece el nivel general. Esta perspectiva se complementa con los aportes de Holt (2004), quien subraya que los ciclos económicos representan oscilaciones prolongadas por encima o por debajo de la trayectoria principal, aspecto fundamental para comprender la dinámica de mercados agrícolas, en los cuales los movimientos estacionales y cíclicos interactúan y afectan significativamente los niveles de producción y precios. Finalmente, todo proceso de descomposición reconoce la existencia de variaciones irregulares, es decir, fluctuaciones no sistemáticas que no pueden atribuirse a los patrones estructurados de la serie. Estas perturbaciones pueden originarse por factores externos o eventos imprevistos, y constituyen el límite natural de cualquier modelo de pronóstico (Chatfield, 2019). Derivado de ello, se reconoce que la estimación siempre presenta errores, ya sean sistemáticos por sesgo o aleatorios por variaciones no controlables; la tarea del modelador consiste en minimizar su magnitud mediante la selección adecuada de métodos estadísticos y técnicas de suavización.

### **1. Error de pronóstico**

- **Error de sesgo** Surge debido a errores sistemáticos, los cuales generalmente ocurren cuando se pasan por alto o se estiman incorrectamente ciertos patrones de demanda

- **El error aleatorio** Se produce debido a variables impredecibles, como huelgas, paros laborales o condiciones climáticas, que provocan desviaciones entre los pronósticos y la demanda real.

Siempre se intenta minimizar los errores seleccionando el método que más se ajuste a la serie, pero es imposible eliminar el error de los pronósticos. El error del pronóstico es la diferencia entre el valor pronosticado y el valor real de la demanda para un determinado periodo, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Et = Dt - F$$

Donde:

*Et* = error de pronóstico para el periodo *t*

*Dt* = demanda real para el periodo *t*

*Ft* = pronóstico para el periodo *t*

A veces es preferible medir el error del pronóstico en un periodo de tiempo largo que un periodo específico, por esta razón se suman los errores de pronóstico. Esta suma acumulativa de errores se la conoce como CFE.

CFE – Cumulative Forecast Error (Error de Pronóstico Acumulado)

$$CFE = \sum_{t=0}^{t=\infty} Et$$

El error de pronósticos promedio está dado por:

$$\hat{E} = \frac{CFE}{n}$$

La desviación media absoluta MAD que mide la dispersión de los errores de pronóstico, está dada por:

MAD – Mean Absolute Deviation (Desviación Media Absoluta)

$$MAD = \frac{\sum |Et|}{n}$$

Mientras que el cuadro del error medio (MSE) mide la dispersión de los errores de pronóstico:

MSD (o MSE) – Mean Squared Deviation/Error (Error Cuadrático Medio)

$$MSD = \frac{\sum E_t^2}{n}$$

Los modelos de pronóstico que se emplean en este trabajo de investigación son Univariados, se destacan los siguientes:

- **Modelos ARIMA**

Los modelos ARIMA han mantenido un papel central en el análisis y pronóstico de series temporales debido a su capacidad para capturar la estructura dinámica de los datos. Según Box & Jenkins (1970), estos modelos permiten representar procesos lineales mediante la combinación de componentes autorregresivos, integrados y de medias móviles, lo que facilita comprender la dependencia temporal entre observaciones. Por su parte, Hyndman y Athanasopoulos (2018) destacan que la metodología ARIMA continúa siendo una de las más utilizadas debido a su efectividad para generar pronósticos confiables, incluso cuando las series presentan variaciones pronunciadas o requieren transformaciones para alcanzar la estacionariedad. Asimismo, Shumway y Stoffer (2017) señalan que la flexibilidad del modelo permite adaptarse a diferentes patrones temporales, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para series que deben ser estabilizadas antes de su estimación.

Un aspecto destacado es su capacidad para transformar series no estacionarias en procesos estables mediante operaciones de diferenciación. Esta característica es particularmente relevante en variables económicas como precios agrícolas, donde la presencia de tendencias o cambios estructurales dificulta la aplicación de modelos más rígidos. En este sentido, Mahmoud (2023) subraya que el ARIMA continúa siendo una herramienta robusta cuando el comportamiento histórico de la serie es el principal determinante de su evolución.

La literatura reciente también ha demostrado que, a pesar del crecimiento de enfoques basados en inteligencia artificial, los modelos ARIMA siguen ofreciendo ventajas importantes, especialmente en contextos donde la interpretabilidad y el bajo requerimiento computacional son factores críticos. Es importante mencionar que, Xia (2024) encontró que, en el pronóstico de precios agrícolas, los ARIMA presentan resultados comparables e incluso superiores a modelos complejos como LSTM cuando se trabaja con datos mensuales o de frecuencia intermedia.

- **Pruebas para modelos de series temporales**

La validación de modelos ARMA y ARIMA constituye un paso crucial en el análisis de series temporales, pues permite determinar si la especificación elegida captura adecuadamente la estructura dinámica de los datos. En la práctica contemporánea, estos modelos se consideran válidos únicamente cuando los residuos resultantes se

comportan como ruido blanco, condición indispensable para garantizar la ausencia de correlación serial y la eficiencia de los estimadores. El proceso de diagnóstico es tan importante como la propia estimación, dado que una especificación incorrecta puede conducir a inferencias sesgadas y pronósticos poco confiables (Hyndman y Athanasopoulos, 2021).

La comparación entre modelos ARMA alternativos requiere metodologías específicas, particularmente cuando las especificaciones no están anidadas. En estos casos, los criterios de información como el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC) permiten comparar modelos con estructuras diferentes al equilibrar el ajuste a los datos con la complejidad paramétrica. Según Box & Jenkins (1976), Estos criterios penalizan la inclusión de parámetros adicionales, favoreciendo modelos parsimoniosos que mantengan un buen ajuste predictivo. La selección del modelo óptimo mediante la metodología Box-Jenkins involucra un proceso iterativo que combina la identificación de la estructura del modelo, la estimación de parámetros y la verificación diagnóstica exhaustiva. El diagnóstico posterior a la estimación representa la fase final y decisiva en la validación de modelos ARMA e ARIMA. Este proceso involucra múltiples herramientas: la función de autocorrelación (ACF) de los residuos debe mostrar ausencia de estructura significativa, y la prueba de Ljung-Box evalúa formalmente la hipótesis nula de no autocorrelación conjunta hasta determinado rezago. Hyndman y Athanasopoulos (2021). Además, el análisis debe incluir la verificación de heterocedasticidad y normalidad de los residuos. Solo cuando estos diagnósticos confirman el comportamiento de ruido blanco puede considerarse que el modelo ha capturado satisfactoriamente la estructura temporal de la serie, respaldando así la validez de las inferencias y pronósticos generados.

### **Modelos ARIMAX**

El modelo Autoregresivo Integrado de Promedio Móvil con Variables Exógenas (ARIMAX) representa una extensión fundamental del modelo ARIMA tradicional para el análisis y pronóstico de series temporales. ARIMAX amplía el marco ARIMA al integrar variables exógenas, es decir, factores externos que pueden influir significativamente en la serie temporal bajo estudio. Esta integración permite al modelo aprovechar información adicional que puede mejorar sustancialmente la precisión del pronóstico (Hyndman y Athanasopoulos, 2021).

Las variables exógenas pueden ser de cualquier tipo: indicadores económicos como tasas de inflación o índices de precios, datos meteorológicos, o cualquier medición que varíe en el tiempo. La técnica ARIMAX aplica un enfoque de series temporales que incorpora factores influyentes externos, lo que ayuda a reducir los valores de error y mejorar la precisión general del modelo, incluso en casos donde las longitudes de los conjuntos de datos de entrada y salida son similares (Alharbi y Csala, 2022). Por ejemplo, en la predicción de demanda eléctrica residencial, mientras un modelo ARIMA se basaría únicamente en datos históricos de consumo, un modelo ARIMAX podría incorporar factores como temperatura, humedad relativa y variables dummy para días de la semana, conduciendo a predicciones más precisas (Bennett et al., 2014).

Un aspecto crítico del modelamiento ARIMAX es que las variables exógenas deben ser conocidas para estimar la variable de interés. Esto funciona adecuadamente cuando las variables exógenas son días festivos, días de la semana u otros factores predeterminados. Sin embargo, si se requiere pronosticar variables exógenas como precios de índices bursátiles o temperatura, el modelo ARIMAX resulta útil principalmente para análisis causal, pero no para pronóstico a futuro, a menos que se dispongan de valores futuros de estas variables (Hyndman y Athanasopoulos, 2021).

La implementación del modelo ARIMAX incluye fases clave como preprocesamiento de datos, pruebas de estacionariedad mediante la prueba de Dickey-Fuller, identificación del modelo, estimación de parámetros mediante Máxima Verosimilitud y diagnóstico exhaustivo del modelo (Alharbi & Csala, 2022). El diagnóstico posterior a la estimación implica examinar los residuos para asegurar que se asemejen a ruido blanco y realizar pruebas de autocorrelación como la prueba de Ljung-Box. Los modelos ARIMAX combinan términos lineales y cuadráticos de variables exógenas como la temperatura, además de incluir algoritmos de suavizado exponencial doble para capturar tendencias generales en los datos (Bennett et al., 2014). La inclusión de variables exógenas representa un avance crítico que ofrece un desempeño predictivo mejorado en sistemas complejos influenciados por factores externos, consolidando al ARIMAX como una herramienta robusta para pronósticos precisos y fundamentados en diversas aplicaciones.

La implementación de un modelo ARIMAX implica varios pasos críticos. En primer lugar, la preparación de los datos es esencial, lo que incluye el manejo de los valores faltantes, los valores atípicos y la garantía de que las variables exógenas sean relevantes y estén correctamente alineadas con la variable dependiente (Majka, 2024).

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^p \theta_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + \sum_{k=1}^r \beta_k X_{t,k} + \varepsilon_t$$

Donde:

- $Y_t$ : valor de la serie temporal en el tiempo  $t$
- $c$ : constante del modelo
- $\theta_i$ : coeficiente autorregresivos (AR)
- $Y_{t-i}$ : valores rezagados de la serie
- $\varepsilon_{t-j}$ : errores rezagados de la serie
- $X_{t,k}$ : variables exógenas en el tiempo  $t$  (pueden ser varias, de ahí subíndice  $k$ )
- $\beta_k$ : coeficientes asociados a cada variable exógena
- $\varepsilon_t$ : término de error aleatorio

### Modelamiento predictivo con XGBoost

El modelamiento predictivo con XGBoost se fundamenta en la técnica de gradient boosting aplicada a árboles de decisión, que combina múltiples árboles secuenciales para corregir errores de modelos anteriores, mejorando precisión y capacidad de generalización. Este algoritmo incluye funciones de regularización para prevenir sobreajuste y es altamente eficiente gracias a su paralelización y aceleración por GPU, lo cual permite manejar grandes volúmenes de datos con rendimiento superior (Chen et al., 2016).

En aplicaciones climáticas, XGBoost ha demostrado ser particularmente efectivo para captar patrones no lineales complejos que usualmente escapan a modelos estadísticos tradicionales como ARIMA. Un estudio en India informó que XGBoost superó significativamente a los modelos ARIMA y de espacio de estados en la predicción de patrones de precipitación, destacando en la captura de relaciones no lineales intrínsecas a estos datos Debenham. (2024). Esto se debe a la capacidad

aditiva y no lineal del algoritmo, que facilita la incorporación de variables exógenas, como índices meteorológicos, mejorando la precisión en series temporales climáticas

Además, XGBoost ha sido empleado exitosamente para corregir sesgos en predicciones meteorológicas y mejorar la precisión de pronósticos de corto plazo en regiones específicas, como en estudios sobre precipitación invernal en China (Dong, 2023) La versatilidad del modelo también se extiende a otras áreas, aunque en casos muy específicos, como la predicción de casos COVID-19 en Bangladesh, los modelos ARIMA han presentado mejor desempeño debido a la naturaleza particular de datos epidemiológicos, aunque XGBoost sigue siendo valioso para capturar tendencias no lineales y estacionales en diversas aplicaciones (Rahman et al., 2022).

### 2.3. Marco legal

El comportamiento del precio del cacao en Ecuador se encuentra regulado por un conjunto de normas nacionales e internacionales que abarcan la producción, comercialización, estándares de calidad y políticas de precios agrícolas. La Constitución de la República del Ecuador (2008) establece la protección de los productores agrícolas, promoviendo la sostenibilidad y garantizando el acceso a mercados justos y equitativos (Asamblea Nacional, 2008). Esta disposición constituye el marco jurídico fundamental para la recolección y análisis de datos de precios en los centros de acopio, asegurando que se consideren los derechos y condiciones de los agricultores, así como la transparencia en las transacciones comerciales. En este sentido, cualquier estudio sobre precios promedio debe contemplar la normativa que protege tanto a productores como a consumidores, especialmente en un producto estratégico como el cacao.

La Ley Orgánica de Desarrollo Agropecuario Sostenible y Bienestar Animal (LODA, 2011) regula la producción y comercialización de productos agrícolas estratégicos, incluyendo el cacao, y promueve la recolección de información confiable sobre cultivos y precios en el mercado local (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2011). Asimismo, los reglamentos técnicos del cacao, tales como la Norma INEN 2691 sobre cacao en grano, definen los criterios de clasificación para cacao CCN 51, fino de aroma y mezclado, y determinan parámetros de calidad física y química del grano (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017). La correcta categorización del cacao según tipo y calidad es esencial para analizar la incidencia de los precios promedio en los

diferentes centros de acopio, ya que los mercados remuneran de manera diferenciada a cada variedad y a cada estándar de calidad.

En relación con la certificación y comercio justo, la normativa internacional de Fair Trade establece que los productores deben recibir un precio mínimo garantizado y primas adicionales por prácticas sostenibles y producción ética (Fair Trade International, 2022). Esta certificación busca mejorar la calidad de vida de los agricultores y fomenta la sostenibilidad en la producción de cacao. Asimismo, las normas internacionales de calidad para cacao fino de aroma, como las definidas por la International Cocoa Organization (ICCO, 2021) y la norma ISO 34101-1 (2019), determinan criterios de aroma, sabor, humedad y porcentaje de granos defectuosos, los cuales influyen directamente en el valor de mercado del producto. La consideración de estas certificaciones y estándares permite que el análisis de precios refleje no solo la oferta y demanda, sino también los efectos de la calidad y la certificación sobre la valorización del cacao en el mercado.

Por otra parte, la regulación económica y de precios en Ecuador, implementada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Banco Central del Ecuador, establece lineamientos para el monitoreo y reporte de precios de productos agroindustriales estratégicos, incluido el cacao (MAG, 2023). El Sistema de Información de Productos Agroindustriales (SIPA) recopila datos históricos mensuales de precios por provincia y tipo de cacao, proporcionando la fuente oficial que permite analizar patrones y tendencias de precios entre 2012 y 2024. Este marco legal y normativo asegura que el análisis sea confiable, transparente y útil para la elaboración de modelos econométricos y de aprendizaje automático que pronostiquen los precios futuros, considerando factores de calidad, certificación y variaciones regionales.

En conclusión, el cumplimiento de las normas legales, técnicas y de certificación es esencial para garantizar que la investigación sobre el comportamiento del precio del cacao en Ecuador sea válida, representativa y coherente con la normativa vigente, permitiendo que los resultados sean aplicables para la toma de decisiones en políticas agrícolas, comercio justo y planificación económica en el sector cacaotero.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Descripción del área de estudio/grupo de estudio**

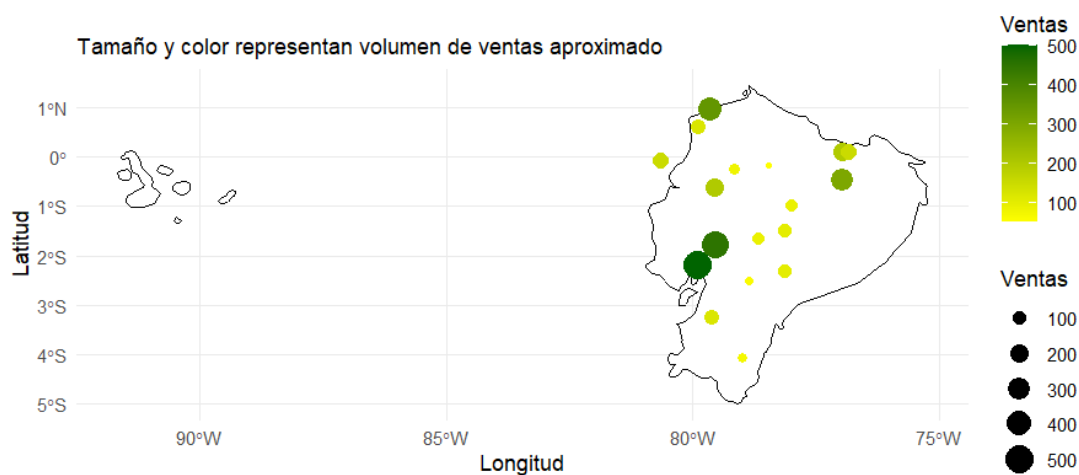
El área de estudio para este análisis comprendió el territorio de la República del Ecuador, incluyendo las provincias registradas en el Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería, principalmente en las zonas costera y amazónica. Las provincias con mayor producción de cacao fueron Guayas, Los Ríos, Orellana, Sucumbíos y Esmeraldas.

#### **Grupo de estudio:**

El grupo de estudio estuvo compuesto por registros de ventas de cacao provenientes de diferentes provincias del país, lo que permitió obtener una visión representativa del comportamiento del mercado a nivel nacional. En la fase descriptiva, se analizaron las tendencias y variaciones en los precios de las distintas categorías de cacao a lo largo del tiempo. Para el modelamiento estadístico, se empleó un enfoque multivariado, donde la variable dependiente fue el precio del cacao, modelado en función de su propio historial de precios. Este enfoque permitió identificar patrones, tendencias y posibles fluctuaciones en el mercado, facilitando la comprensión de su comportamiento a lo largo del tiempo y proporcionando una base para futuras proyecciones y toma de decisiones en el sector cacaotero.

## Figura 1

### *Distribución geográfica de las provincias productoras de cacao*



## 3.2. Enfoque y tipo de investigación

### Enfoque

El enfoque de investigación para este estudio fue cuantitativo, ya que implicó la recolección y análisis de datos numéricos sobre el precio promedio del cacao en Ecuador. Específicamente, el estudio empleó un enfoque cuantitativo descriptivo e inferencial.

### Tipo de Investigación

El presente estudio se enmarca en el enfoque cuantitativo y no experimental, ya que se trabaja exclusivamente con datos históricos del precio del cacao sin manipular ninguna variable, lo cual coincide con lo señalado por Beas et al. (2023), quienes afirman que los análisis basados en series temporales se desarrollan observando el comportamiento natural de los datos tal como ocurren en el tiempo. Asimismo, el diseño se clasifica como descriptivo, puesto que busca caracterizar la evolución temporal de los precios y sus patrones sin intervenir en las condiciones del mercado, analizando su comportamiento a lo largo del tiempo para identificar tendencias, estacionalidades y fluctuaciones propias de la dinámica económica. De igual forma, se adopta un nivel correlacional, dado que el estudio examina relaciones entre variaciones temporales y posibles asociaciones entre periodos o ciclos, siguiendo el enfoque planteado por Ferrán y Escot (2019), quienes analizan la covariación temporal de indicadores económicos sin intervención experimental.

Además, el uso de modelos o análisis de series temporales dentro de un diseño no experimental se respalda en investigaciones recientes que evalúan cómo las variables se comportan conjuntamente en el tiempo, sin manipulación directa, como se evidencia en el estudio de Camacho y Bajaña (2020), donde se aplican modelos VAR para explicar relaciones dinámicas entre variables económicas a partir de datos observados. En conjunto, estas referencias demuestran que el análisis de series históricas del precio del cacao en Ecuador se ajusta plenamente a un diseño no experimental, descriptivo y correlacional, ya que permite identificar tendencias, ciclos y relaciones internas de la serie sin alterar su comportamiento natural.

### 3.3. Definición y operacionalización de variables

Para este estudio se definieron y operacionalizaron las variables que permitieron analizar la dinámica del precio del cacao registrado el Sistema de Información Pública Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2025) durante el período 2012–2024. La variable dependiente corresponde al precio promedio mensual del cacao registrado por provincia, mientras que las variables independientes incluyen la provincia y el tipo de cacao reportado. Cada variable fue estructurada según su naturaleza, unidad de análisis y fuente de información (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Definición operacional de las variables utilizadas en el estudio sobre el precio del cacao en Ecuador (2012–2024)*

<b>Tipo de variable</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Fuente de datos</b>
<b>Dependiente</b>	<b>Precio promedio del cacao</b>	Precio promedio mensual del cacao en quintales para cada provincia y tipo de cacao durante el período 2012–2024.	Dólares por quintal (variable cuantitativa continua).	Sistema Nacional de Información del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
<b>Independiente</b>	<b>Provincia</b>	Cada una de las provincias registradas en el Sistema de Información Pública	Variable categórica nominal.	Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA) – MAG.

Tipo de variable	Nombre de la variable	Definición operacional	Unidad de medida	Fuente de datos
		Agropecuaria (SIPA) del MAG.		
<b>Independiente</b>	<b>Tipo de cacao</b>	Clasificación del cacao según su variedad registrada (por ejemplo: Nacional, CCN51, u otras).	Variable categórica nominal.	Sistema Nacional de Información del MAG.

#### **Definición operacional:**

En este estudio, la variable Tipo de cacao se clasifica en seis categorías según su estado de procesamiento y características específicas: Fino de Aroma seco, reconocido por su calidad sensorial y aroma floral tras la fermentación y secado; CCN-51 seco, de mayor rendimiento productivo y notas sensoriales intensas; Cacao mezclado seco, combinación de ambas variedades sin diferenciación específica; Fino de Aroma en baba, en estado fresco con su mucílago intacto, esencial para la fermentación; CCN-51 en baba, también sin fermentar ni secar, con un perfil de sabor influenciado por su procesamiento; y Cacao mezclado en baba, mezcla de granos frescos de ambas variedades, lo que afecta su homogeneidad en calidad y características finales.

Variable de control.

Año

**Definición operacional:** Año calendario durante el período 2012-2024.

Variable categórica ordinal

#### **Tabla 2**

*Operacionalización de variable independiente para pronosticar el precio promedio de cacao en el mercado local de Ecuador*

Variable	Dimensión	Indicadores	Técnica	Instrumento
----------	-----------	-------------	---------	-------------

Precipitaciones	milímetros (mm)	litros por metro cuadrado (l/m <sup>2</sup> )	Análisis de series temporales	Precipitación Total Mensual - Datos Abiertos Ecuador/R Studio
Temperatura	Temperatura media mensual	grados Celsius (°C)	Análisis de series temporales	Datos Abiertos Ecuador / R Studio
Precio tonelada Métrica de cacao	dólares por tonelada métrica (USD/tm)	Precio mensual histórico	Análisis de series temporales	Bolsa de Valores / Datos Abiertos / R Studio
Año	Temporal	Años evaluados (2012-2024),	Análisis de tendencia	Base de datos SIPA, / R Studio
Mes	Temporal	Meses analizados (enero- diciembre)	Análisis de tendencia	Base de datos SIPA, / R Studio

### Variable Dependiente

La variable dependiente del estudio corresponde al precio promedio del cacao en el mercado local de Ecuador. Para su análisis, se consideraron los registros mensuales y anuales del precio, así como su variación a lo largo del período 2012–2024. La información fue obtenida del Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA, 2025) y procesada mediante el software R Studio, aplicando técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales para caracterizar los cambios y tendencias de los precios. La definición operacional de esta variable se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Operacionalización de variable dependiente*

Variable	Dimensión	Indicadores	Técnica	Instrumento
----------	-----------	-------------	---------	-------------

Precio promedio del cacao	Temporal	Precio mensual, anual, variación	Estadística descriptiva e inferencial	Base de datos SIPA, / R Studio
---------------------------	----------	----------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------

### 3.4. Procedimientos

#### **Fase 1. Determinación de la incidencia de los precios promedio según el tipo de cacao (Cacao CCN 51 en Baba, Cacao en Baba fino de aroma, Cacao en Baba Mezclado, Cacao CCN 51 Seco, Cacao seco fino de aroma, Cacao Seco mezclado) en el mercado local desde el año 2012 al 2024**

Los datos utilizados provinieron del Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería, específicamente del conjunto de datos Precios agroindustriales: Base estadística del módulo económico (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2025). La información bruta fue descargada en formato Excel y posteriormente depurada y organizada en una base estructurada mediante el software R, empleando principalmente los paquetes readxl para la importación de archivos, dplyr y tidyr para la depuración y transformación de variables, y stringr junto con janitor para la estandarización de nombres y la corrección de inconsistencias tipográficas.

Asimismo, se transformaron las fechas para generar las variables año y mes utilizando el paquete lubridate, lo cual permitió ordenar cronológicamente la serie y facilitar su análisis temporal. El tratamiento de la base incluyó la identificación y manejo de datos faltantes, así como la detección de valores atípicos mediante gráficos exploratorios generados con ggplot2, funciones estadísticas y herramientas que permitieron diferenciar errores de registro de variaciones reales del mercado. Finalmente, la base fue reorganizada por año, mes, provincia, tipo de cacao, precio, garantizando su coherencia interna y optimizando su uso para análisis descriptivo y comparativo de las diferentes categorías tipos de cacao

#### **Fase 2. Análisis los patrones y tendencias del precio del tipo de cacao en Ecuador desde el 2012 al 2024, considerando la variación del precio promedio en las provincias registradas en el sistema de información de productos agroindustriales del Ecuador**

La Fase 2 consistió en el análisis de patrones y tendencias del precio del cacao en Ecuador durante el período 2012–2024, considerando la variación del precio promedio entre las provincias reportadas por el Sistema de Información de Productos Agroindustriales (SIPA). Para ello se desarrolló un proceso metodológico riguroso basado en el uso del software RStudio como instrumento principal de análisis. Se efectuó un análisis exploratorio para identificar fluctuaciones mensuales, variaciones anuales y diferencias provinciales, empleando funciones del paquete stats y procedimientos de filtrado y agrupamiento mediante dplyr. La estructura temporal de la base se garantizó mediante la estandarización de fechas con lubridate, mientras que la depuración y codificación de variables se realizó con stringr y janitor para asegurar coherencia en categorías como tipo de cacao y provincia.

Posteriormente, se generaron visualizaciones con ggplot2, incluyendo series temporales y comparaciones por tipo de cacao (CCN 51 y Fino de Aroma), lo que permitió observar patrones de estacionalidad y diferencias en su comportamiento. El tratamiento de calidad de datos incorporó la identificación de faltantes y la detección de valores atípicos mediante métodos como IQR, boxplot.stats y herramientas complementarias de tsoutliers, distinguiendo entre errores y variaciones reales del mercado. Finalmente, la comparación descriptiva entre los tipos de cacao permitió identificar diferencias estructurales en sus niveles de precios y tendencias a lo largo del período.

### **Fase 3. Pronóstico el precio promedio de cacao en el mercado local de Ecuador, utilizando datos históricos del período 2012-2024, mediante el desarrollo de modelos econométricos y de aprendizaje automático, incluyendo enfoque multivariantes híbridos, para identificar el modelo con mayor precisión predictiva**

La metodología empleada en este estudio se fundamenta en el enfoque de Box y Jenkins (1970), que establece un proceso sistemático para el modelado de series temporales mediante ARIMA. Siguiendo esta metodología, se desarrollan cinco fases secuenciales: análisis preliminar para lograr estacionariedad en la serie, identificación de la estructura del modelo mediante funciones de autocorrelación, predicción de parámetros utilizando métodos estadísticos robustos, diagnóstico del modelo a través de pruebas en los residuos y, finalmente, generación de pronósticos. Choque et al.

(2021) implementaron exitosamente este enfoque en su estudio sobre la producción de plátano en Piura, demostrando su eficacia para el análisis univariante de productos agrícolas.

Para modelar y predecir los precios del cacao, se implementaron modelos predictivos basados en técnicas estadísticas y el enfoque AutoRegressive Integrated Moving Average (ARIMA). La selección de cada modelo se realizó considerando propiedades clave de la serie temporal, como la estacionalidad y la tendencia. Siguiendo metodologías previas, se utilizaron las siguientes métricas:

- RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio)
- MAE (Error Absoluto Medio)
- MPE (Porcentaje de Error Medio)
- MAPE (Error Absoluto Porcentual Medio)
- MASE (Error Absoluto Escalado Medio)

Estas métricas permitieron evaluar la precisión, el ajuste y la capacidad predictiva de los modelos seleccionados.

Este enfoque se respalda en la metodología propuesta por Tao et al., (2021), quienes emplearon los criterios AIC y MSE para seleccionar el modelo ARIMA óptimo en series temporales de precipitación. Su estudio demostró que la aplicación de estos criterios permite mejorar la precisión de los pronósticos, garantizando la confiabilidad de los modelos ajustados a los datos analizados.

La metodología empleada para evaluar los modelos multivariantes se diseñó para pronosticar el precio promedio del cacao en Ecuador, utilizando datos históricos mensuales de 2012 a 2024. Los datos incluyeron la variable dependiente (precio promedio por quintal) y tres variables exógenas: temperatura, precipitación, y precio por tonelada métrica. A continuación, se detallan los pasos realizados:

#### **i. Preparación de los datos**

Los datos se obtuvieron de una base en formato Excel (base\_datos.xlsx), incluyendo las siguientes variables:

- Variable dependiente: **Precio promedio por quintal de cacao**
- Variables exógenas: **Temperatura, precipitación, y precio internacional por tonelada métrica.**

Se utilizó un esquema de partición temporal en el que los datos de entrenamiento comprenden todos los meses excepto los últimos cuatro, que se reservaron para la fase de prueba ( $\text{test\_size} = 4$ ). Las variables exógenas se dividieron en  $x_{\text{train}}$  y  $x_{\text{test}}$ , mientras que la variable objetivo se definió como  $y_{\text{train}}$  y  $y_{\text{test}}$ . Este enfoque permite realizar pronósticos dentro de la muestra (in-sample forecast) durante el entrenamiento y pronósticos fuera de la muestra (out-of-sample forecast) para evaluar el rendimiento del modelo.

## ii. Modelos evaluados

Se implementaron nueve modelos multivariantes, todos con inclusión de las variables exógenas:

- **SARIMAX (2,1,2) (1,1,0) [12]**: modelo con componentes ARIMA y estacionalidad mensual.
- **SARIMAX (1,1,1) (0,1,1) [12]**: versión más sencilla con menor orden.
- **ARIMAX (3,1,2)**: modelo base sin estacionalidad.
- **Híbrido ARIMAX + XGBoost**: combinación de ARIMAX con XGBoost para modelar los residuos.
- **Híbrido ARIMAX + Random Forest**: integración con bosque aleatorio sobre residuos.
- **Híbrido ARIMAX + Red Neuronal (NN)**: red neuronal con cinco neuronas en la capa oculta.
- **Híbrido ARIMAX + LSTM**: modelo con red de memoria a largo plazo.
- **Híbrido ARIMAX + SVM**: incorporación de máquinas de soporte vectorial para regresión.
- **El modelo XGBoost se entrenó usando los siguientes parámetros:** XGBoost puro y el modelo de aprendizaje automático sin componente ARIMAX.

### iii. Implementación de modelos

Los modelos SARIMAX y ARIMAX se ajustaron mediante la función Arima() del paquete forecast de R, especificando orden y estacionalidad, y añadiendo las variables exógenas como xreg.

En los modelos híbridos, se siguieron dos etapas:

- Ajuste de ARIMAX y cálculo de residuos.
- Entrenamiento de modelos de ML (XGBoost, RF, NN, LSTM, SVM) sobre los residuos.
- **El modelo XGBoost se entrenó usando los siguientes parámetros:** Para el entrenamiento del modelo XGBoost, se establecieron parámetros orientados a optimizar el equilibrio entre la capacidad predictiva y la generalización del modelo. Se utilizó como función objetivo la regresión con error cuadrático medio (reg:squarederror). El parámetro de tasa de aprendizaje (eta) se fijó en 0.1, lo que permite un aprendizaje gradual y más preciso. La profundidad máxima de los árboles (max\_depth) fue de 6 niveles, permitiendo capturar relaciones complejas sin llegar a un sobreajuste. Además, se configuró un peso mínimo de instancia por nodo (min\_child\_weight) de 1, y se introdujo aleatoriedad mediante las tasas de muestreo (subsample = 0.8) y de variables por árbol (colsample\_bytree = 0.8).
- **El modelo ARIMAX + XGBoost:** La precisión en la predicción de la serie temporal, se desarrolló un modelo híbrido que combina un modelo lineal (ARIMAX) con un modelo no lineal basado en árboles de decisión (XGBoost). La metodología seguida se describe a continuación
- **Ajuste del modelo ARIMAX**  
Inicialmente, se entrenó un modelo ARIMAX utilizando variables exógenas seleccionadas. Este modelo permitió capturar la dinámica lineal de la serie, incluyendo tanto componentes autorregresivos como efectos de variables externas.
- **Cálculo de residuos**  
Se calcularon los residuos del modelo ARIMAX como la diferencia entre los valores reales y las predicciones obtenidas. Estos residuos representan la parte del comportamiento de la serie que no fue explicada adecuadamente por el modelo lineal.

- **Entrenamiento del modelo XGBoost sobre residuos**

Para modelar la estructura no lineal contenida en los residuos del ARIMAX, se entrenó un modelo XGBoost utilizando como variable respuesta los residuos y como predictores el mismo conjunto de variables exógenas (y/o características derivadas). Se utilizó la implementación `xgb.train` con parámetros ajustados previamente y un número fijo de iteraciones (nrounds).

- **Predicción híbrida**

El modelo híbrido se construyó sumando las predicciones del modelo ARIMAX con las predicciones del modelo XGBoost aplicado a los residuos. Esto permite que el modelo final capture tanto la estructura lineal (ARIMAX) como los patrones no lineales (XGBoost).

- **Evaluación del modelo híbrido**

La precisión del modelo híbrido fue evaluada utilizando métricas estándar como el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) estas métricas se compararon con las obtenidas por los modelos individuales, evidenciando el aporte del componente no lineal en la mejora de la predicción.

## CAPÍTULO IV

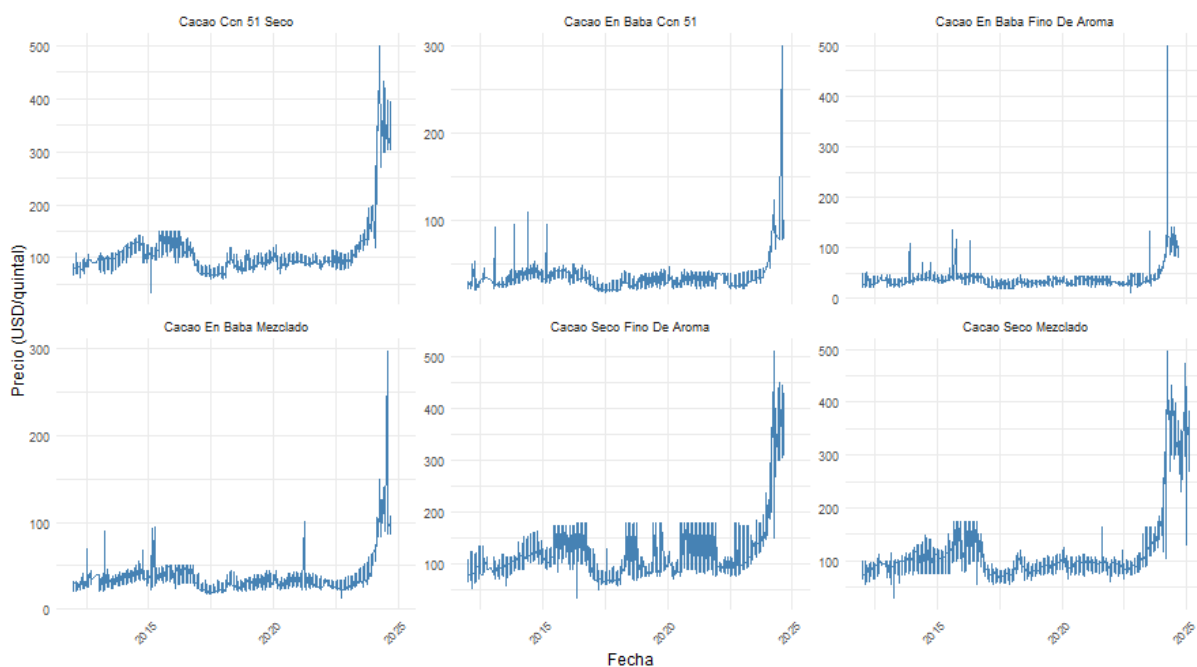
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Determinación de la incidencia de los precios promedio según el tipo de cacao (Cacao CCN 51 en Baba, Cacao en Baba fino de aroma, Cacao en Baba Mezclado, Cacao CCN 51 Seco, Cacao seco fino de aroma, Cacao Seco mezclado) en el mercado local desde el año 2012 al 2024

Se graficaron las series de tiempo de los precios promedio (en USD) para seis categorías de cacao: Cacao CCN 51 en Baba, Cacao CCN 51 Seco, Cacao en Baba Fino de Aroma, Cacao en Baba Mezclado, Cacao Seco Mezclado y Cacao Seco Fino de Aroma. Estos gráficos permitieron visualizar la evolución temporal de los precios para cada tipo de cacao, lo que facilita la identificación de tendencias, variaciones estacionales y diferencias entre categorías.

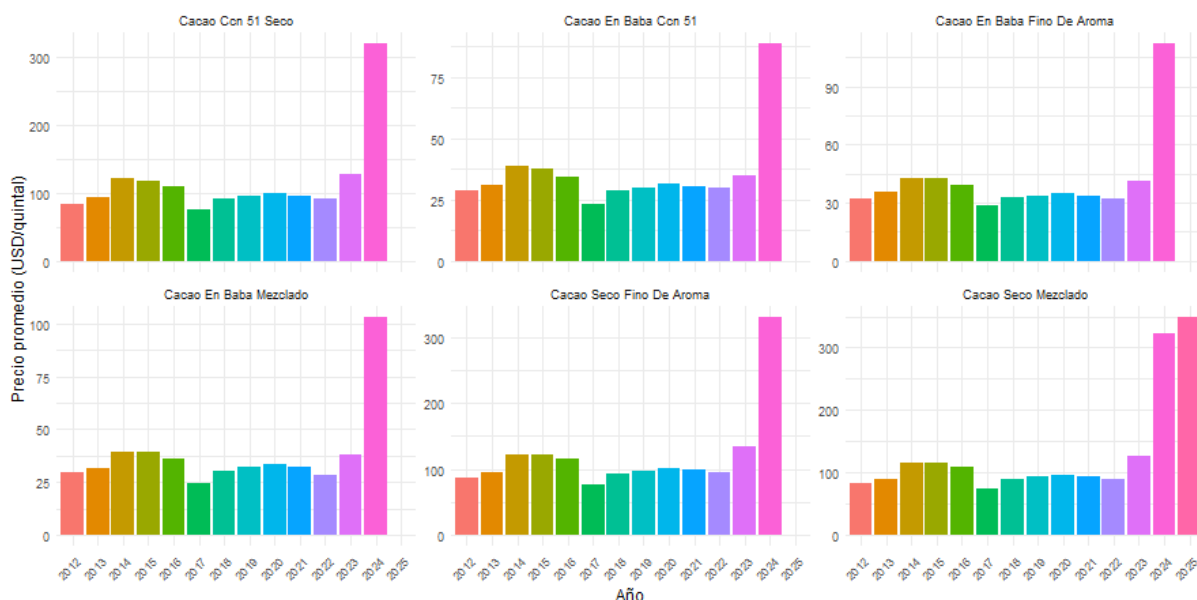
#### Figura 2

*Series de tiempo, para cada tipo de cacao periodo (01 / 01/2012 – 01/01/2025)*



**Figura 3**

*Evolución del precio por tipo de cacao (USD quintal) periodo (01/01/2012–01/01/2025)*



A pesar de los beneficios económicos del cacao CCN51, su predominio ha generado preocupaciones relacionadas con la pérdida de biodiversidad, el impacto ambiental y el desplazamiento del cacao Fino de Aroma, valorado por su perfil sensorial y su importancia en mercados de nicho (Moreno, 2023). En el contexto ecuatoriano, Hidalgo (2020) resalta la necesidad de replantear el modelo productivo, alejándose del enfoque rentista histórico hacia estrategias que prioricen la sostenibilidad y la equidad social. Experiencias como la de APOVINCES, que integra producción orgánica, Comercio Justo y colaboración con la universidad pública, destacan cómo las organizaciones campesinas pueden defender el cacao Fino de Aroma, articulando valores de sostenibilidad, justicia económica y conservación cultural.

El conocimiento sobre las características y la calidad del grano de cacao es esencial para mejorar su valor económico, especialmente en variedades como el cacao Fino de Aroma, que se distingue por su perfil sensorial único y sus beneficios para la salud (Mansur et al., 2023). En este sentido, el trabajo realizado por Teneda (2016) en Ecuador revela que las mejores características de calidad en el cacao Nacional se obtienen a las 60 horas de fermentación, tanto en fermentadores horizontales como rotatorios. Sin embargo, se observó que el fermentador horizontal presentó mayores

concentraciones de flavonoides y polifenoles, mientras que el rotatorio mostró un índice de fermentación superior. Para la variedad CCN51, a las 49.5 horas, el fermentador rotatorio presentó mayores valores de flavonoides y polifenoles, con un mejor grado de fermentación en comparación con el horizontal.

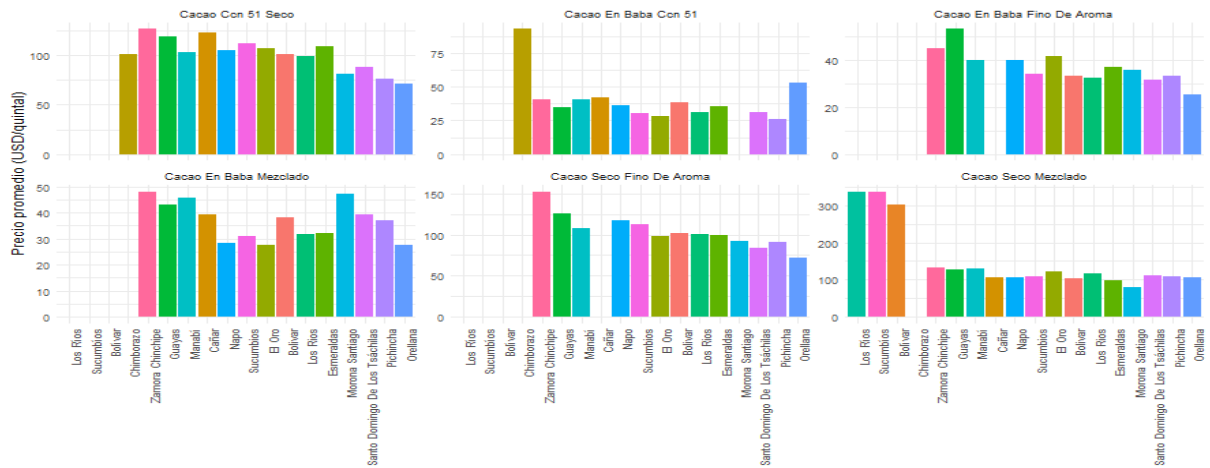
De manera similar, el estudio de Manalu (2019) en Indonesia destaca que los pequeños agricultores en la región de Sulawesi del Sur no suelen fermentar sus granos, lo que afecta negativamente su calidad. Este fenómeno se debe a la falta de incentivos y al tiempo requerido para realizar el proceso de fermentación. Sin embargo, el trabajo también subraya que los granos fermentados alcanzan precios significativamente más altos, en comparación con los granos sin fermentar. Al comparar ambos estudios, se observa que, tanto en Ecuador como en Indonesia, la falta de fermentación en almendras de cacao reduce el valor económico.

#### **4.2. Análisis los patrones y tendencias del precio del tipo de cacao en Ecuador desde el 2012 al 2024, considerando la variación del precio promedio en las provincias registradas en el sistema de información de productos agroindustriales del Ecuador**

La figura 4 muestra el precio promedio por provincia, con las provincias ordenadas de mayor a menor según el precio promedio.

#### **Figura 4**

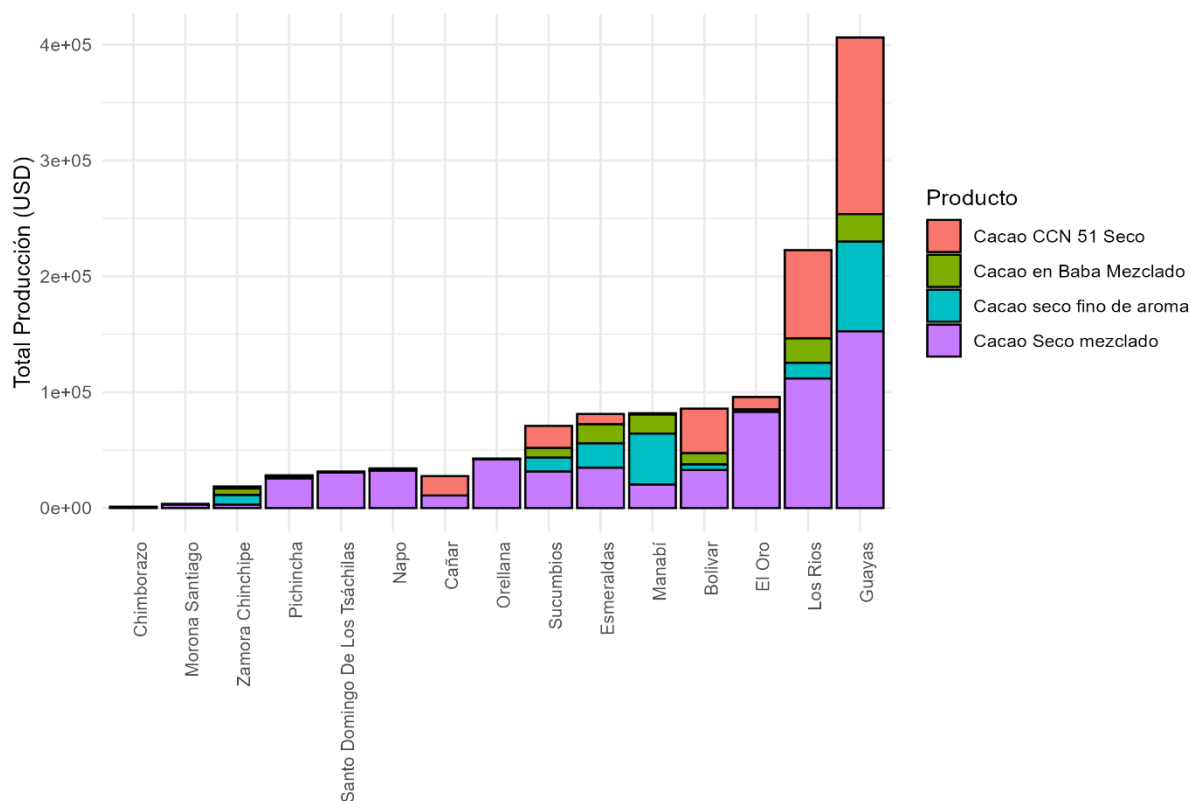
*Precio promedio de cacao (USD) por provincia y producto periodo (01/01/2012–01/01/2025)*



La figura 4 revela una clara disparidad en los precios promedio del cacao entre las provincias ecuatorianas y los diferentes tipos de producto; el cacao fino de aroma, seco, destaca por alcanzar los precios más elevados, mientras que el cacao CCN 51 y el cacao mezclado presentan valores inferiores, lo que sugiere diferencias inherentes en la calidad y demanda de estos productos dentro del mercado local y extranjero. La información recopilada resalta la relevancia del cacao como un producto esencial para la economía de Ecuador, particularmente en el ámbito agrícola y comercial (SIPA).

**Figura 5**

*Total, de producción por provincia y tipo de cacao*



El cacao no solo representa una fuente de ingresos para aproximadamente 400.000 personas, sino que también es un motor económico para provincias productoras como Los Ríos, Guayas, Manabí y Esmeraldas, que contribuyen significativamente a la producción nacional de más de 330.000 toneladas anuales. Este papel fundamental y se complementa con el análisis de Badillo et al. (2023), quien resalta, mediante métodos estadísticos, la importancia económica del cacao en la provincia de Los Ríos, identificando variables como los precios nacionales y de exportación de variedades como el CCN51 y el cacao fino de aroma, lo que pone en evidencia el impacto de este cultivo en las economías locales.

En el año 2024, el cacao ecuatoriano alcanzó cifras históricas en el comercio internacional, posicionándose como uno de los principales productos de exportación no petroleros del país. Según datos del BCE (2024a) las exportaciones de cacao generaron USD 3.617 millones, casi triplicando el valor registrado en 2023. Esta cifra consolidó al cacao como el tercer producto no petrolero de exportación, después del camarón y el banano (Primicias, 2024).

En términos de volumen, Ecuador exportó aproximadamente 471.157 toneladas de cacao, lo que representó un crecimiento del 14,71 % con respecto al año anterior El Oriente (2024), este incremento estuvo fuertemente impulsado por el alza en los precios internacionales, que superaron los USD 10.000 por tonelada debido a una crisis de producción en África Occidental, principal región productora a nivel mundial.

La reciente subida de los precios del cacao se atribuye principalmente al colapso de las cosechas en Costa de Marfil y Ghana, que representan el 60% de la producción mundial. Se estima que la cosecha en estos países ha disminuido en al menos un tercio. Este colapso se debe a factores climáticos, como el fenómeno de El Niño, que causó fluctuaciones irregulares en las lluvias, así como a la deforestación local, que ha agravado la situación en estas regiones productoras (Becker, 2024).

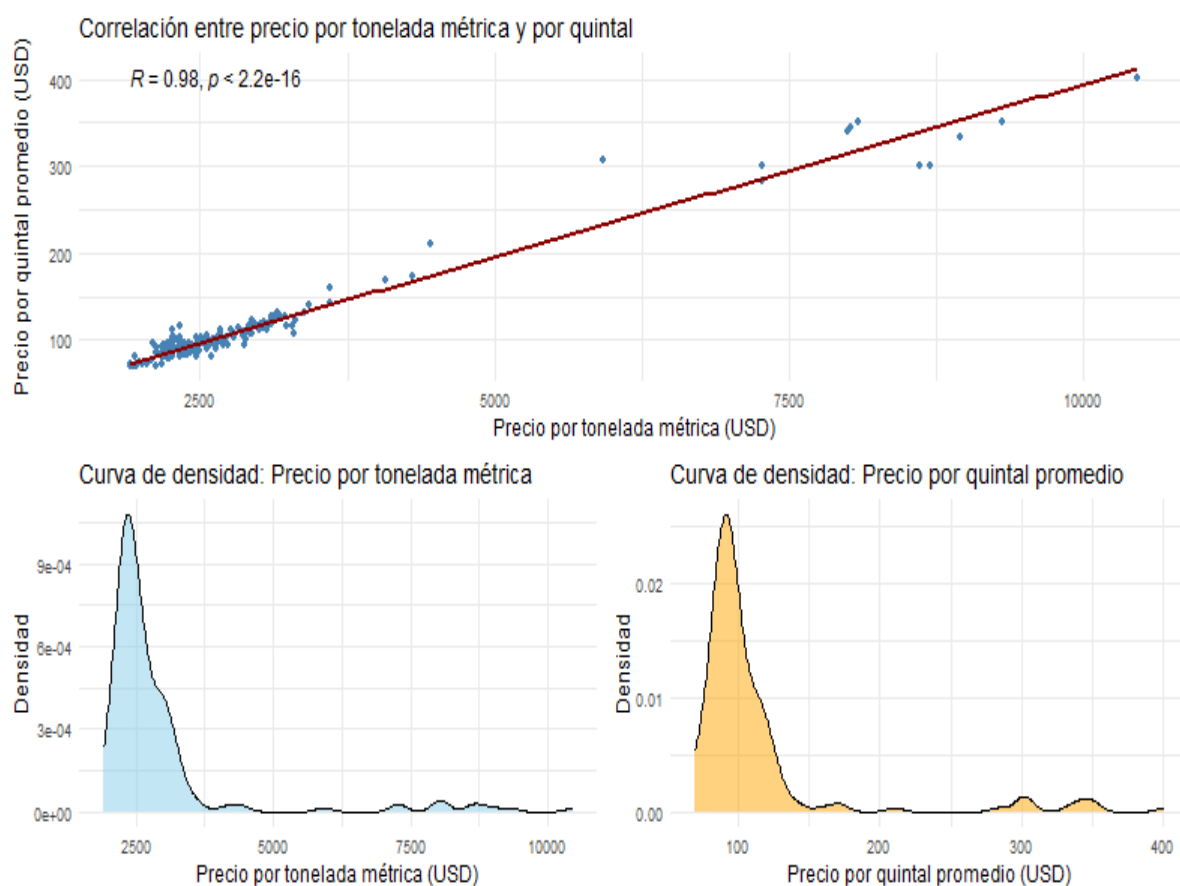
Durante los primeros seis meses de 2024, los precios internacionales del cacao alcanzaron niveles históricos, superando los \$10,000 por tonelada en marzo y \$12,000 en abril, en contraste con los precios habituales de entre \$2,000 y \$4,000 por tonelada. Este aumento drástico en los precios se debe a la baja de la producción, causada principalmente por los problemas climáticos que afectan el cultivo. El cacao es muy sensible a las condiciones climáticas, y tanto la sequía como el exceso de lluvia, provocados por fenómenos como El Niño, dañan el crecimiento del cacao, favoreciendo el desarrollo de plagas y, en consecuencia, reduciendo la producción. Este déficit en la oferta provoca el aumento de los precios en el mercado internacional (Cámara de Comercio de Quito, 2024).

#### **4.3. Pronóstico el precio promedio de cacao en el mercado local de Ecuador, utilizando datos históricos del período 2012-2024, mediante el desarrollo de modelos econométricos y de aprendizaje automático, incluyendo enfoque multivariantes híbridos, para identificar el modelo con mayor precisión predictiva**

Evaluación de modelos predictivos para estimar el precio del quintal de cacao en función de variables climáticas y económicas, utilizando técnicas de regresión estadística y aprendizaje automático.

**Figura 6**

*Coefficiente de correlación de la variable precio internacional de tonelada métrica de cacao y precio quintal promedio en Ecuador*



**Tabla 4**

*Coefficiente de correlación de las variables de estudio*

<b>Variables</b>	<b>Precio quintal</b>	<b>Precio tonelada Métrica</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Precipitación</b>
Precio quintal	1.000	0.978	-0.152	-0.098
Precio tonelada Métrica	0.978	1.000	-0.141	-0.082
Temperatura	-0.152	-0.141	1.000	0.315
Precipitación	-0.098	-0.082	0.315	1.000

**Tabla 5***Análisis del coeficiente de correlación*

<b>Variables</b>	<b>Coeficiente de correlación</b>	<b>Interpretación</b>
Precio quintal – Precio tonelada métrica	0.978	Correlación muy fuerte y positiva. A mayor precio por tonelada, mayor precio por quintal. Indica colinealidad si se usan juntas en un modelo.
Precio quintal – Temperatura	-0.152	Correlación débil y negativa. La temperatura no influye significativamente en el precio.
Precio quintal – Precipitación	-0.098	Correlación muy débil y negativa. La precipitación tiene poca relación con el precio.
Temperatura – Precipitación	0.315	Correlación moderada y positiva. Sugiere una ligera relación estacional entre ambas variables.

**Análisis comparativo de modelos**

Durante el análisis comparativo, se observó que los modelos híbridos lograron, en general, mejores resultados que los modelos tradicionales. Particularmente, el modelo híbrido que combinó ARIMAX con XGBoost fue el que mostró el mejor desempeño, logrando errores considerablemente más bajos en las tres métricas evaluadas

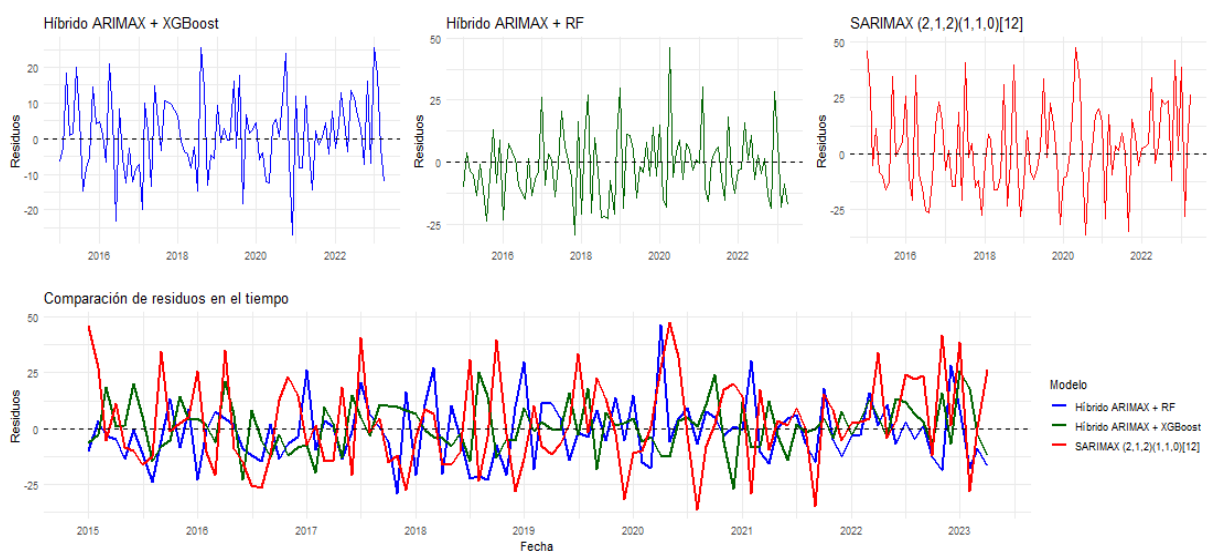
En contraste, los modelos tradicionales como SARIMAX y ARIMAX por sí solos presentaron errores significativamente mayores, evidenciando limitaciones en su capacidad de predicción frente a las alternativas híbridas. Incluso dentro de los modelos híbridos, aquellos que incorporaron técnicas basadas en redes neuronales (NN y LSTM) o máquinas de vectores de soporte (SVM) no lograron superar al enfoque basado en XGBoost, y mantuvieron errores en niveles similares a los de ARIMAX individual.

El modelo híbrido ARIMAX + Random Forest también mostró una mejora respecto a los modelos clásicos, aunque su desempeño fue inferior al del modelo híbrido con XGBoost. En general, la combinación de ARIMAX con algoritmos de aprendizaje automático permitió reducir sustancialmente los errores de predicción, siendo la elección del modelo complementario un factor determinante para el éxito del modelo híbrido.

En conjunto, estos resultados reflejaron que la incorporación de modelos de machine learning a la predicción de series temporales, particularmente XGBoost, permitió optimizar la precisión en las estimaciones, superando ampliamente a los métodos puramente estadísticos.

**Figura 7**

*Errores en el tiempo de los 3 mejores modelos según las mejores métricas*



**Tabla 6**

*Análisis de la influencia de las variables en el modelo Híbrido ARIMAX + XGBoost*

Variable	Gain	Cover	Frequency
Precio tonelada métrica	0.5352943	0.3999333	0.2931961
Temperatura	0.2521296	0.2730192	0.3137869
Precipitación	0.2125761	0.3270475	0.3930170

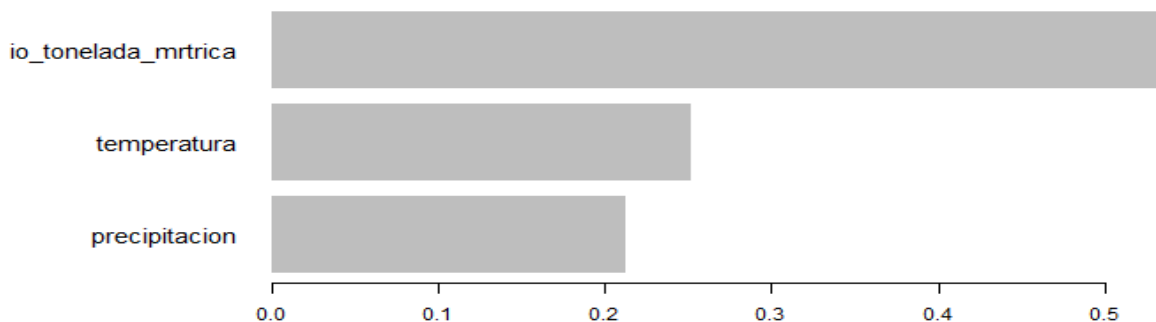
En el modelo XGBoost puro, la variable "Precio por tonelada métrica" domina con un Gain del 89.8%, mientras que Temperatura y Precipitación tienen una influencia marginal.

En el modelo híbrido ARIMAX + XGBoost, la importancia de las tres variables se distribuye de forma más equilibrada: Precio (53.5%), Temperatura (25.2%), y Precipitación (21.3%).

En contraste, el modelo ARIMAX + XGBoost logra una mejor distribución de importancia gracias a su estructura híbrida: el componente ARIMAX captura las tendencias y estacionalidades, lo que permite que el componente XGBoost enfoque su atención en residuos no explicados por el modelo lineal. Esto facilita que variables como Temperatura y Precipitación también sean consideradas relevantes en la fase de predicción (Huang y Huang, 2023).

### Figura 8

*Importancia de las variables predictoras con el modelo híbrido ARIMAX + XGBoost*



### Gain (Ganancia):

Indica la mejora en la precisión del modelo debido a la inclusión de cada característica. Precio tonelada métrica tiene la ganancia más alta (0.535), lo que significa que es la característica más importante para el modelo. Es responsable de la mayor mejora en la predicción.

Temperatura (0.252) y precipitación (0.213) son importantes, pero contribuyen menos que el precio por tonelada métrica.

**Cover** (Cobertura):

Representa la cantidad relativa de datos afectados por esa característica durante el entrenamiento.

Precio tonelada métrica (0.40) tiene una cobertura moderada, por lo que impacta a una parte significativa pero no mayoritaria de los datos.

precipitación (0.33) y temperatura (0.27) cubren un porcentaje similar de los datos siendo los valores cercanos.

**Frecuencia**

Refleja qué tan a menudo cada característica es usada en el modelo (por ejemplo, en árboles de decisión).

precipitación (0.39) es la característica más frecuente, usada casi el 39% del tiempo. temperatura (0.31) le sigue y precio tonelada métrica (0.29) es la menos frecuente, aunque tenga mayor ganancia.

El uso del modelo híbrido ARIMAX + XGBoost ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la capacidad de predicción en contextos complejos donde intervienen tanto dinámicas internas como factores externos. En esta investigación, enfocada en el pronóstico del precio del cacao en Ecuador, el modelo logró un MAPE de 1.77 %, MAE de 5.27 y RMSE de 7.25, cifras que indican un excelente nivel de precisión, considerando la alta volatilidad que caracteriza a los mercados agrícolas.

Comparativamente, en el estudio de Karetin, et al (2018), donde se aplicó un modelo híbrido ARIMA-XGBoost para evaluar la seguridad del suministro energético en China, se alcanzaron errores de predicción inferiores al 4.5 %, lo cual evidencia la eficacia del enfoque híbrido en escenarios estratégicos donde la precisión es crucial para la planificación de políticas públicas.

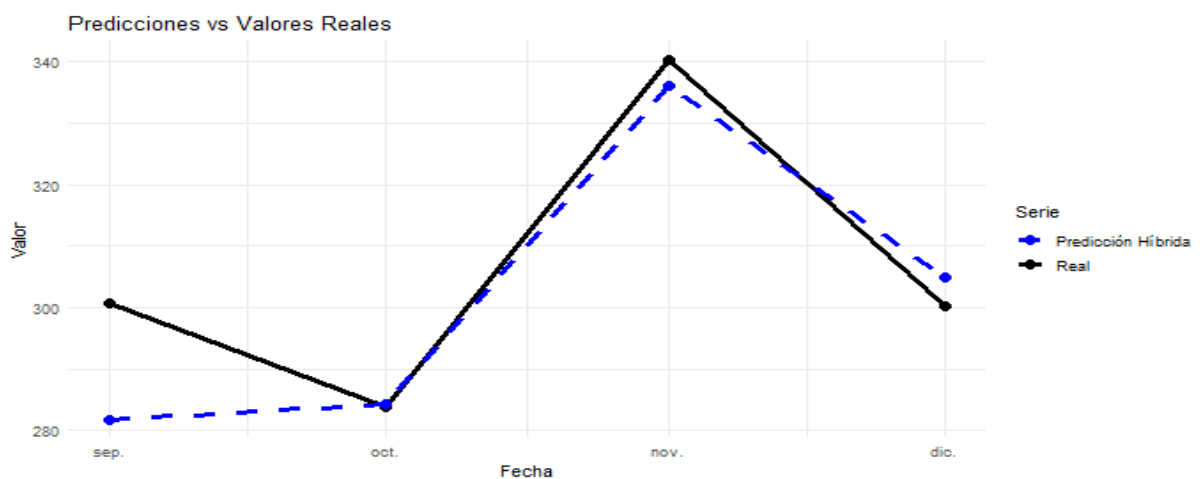
De igual forma, el trabajo de Zhou et al., (2025) empleó un modelo ARIMAX-XGBoost para prever el volumen de turistas en la zona escénica de Elephant Trunk Mountain, obteniendo un MAPE de 6.85 %, MAE de 33.73 y RMSE de 41.52. Aunque los valores absolutos fueron mayores, el desempeño sigue siendo destacable dada la naturaleza fluctuante de los datos turísticos.

Estos tres estudios, aplicados en sectores distintos agrícola, energético y turístico, coinciden en que la integración de un modelo estadístico lineal (ARIMA/ARIMAX) con un algoritmo de aprendizaje automático no lineal (XGBoost) permite capturar mejor tanto las tendencias deterministas como las relaciones no lineales. En particular, XGBoost mejora la capacidad del modelo para aprender patrones complejos y no estacionarios que los modelos ARIMA tradicionales no pueden abordar por sí solos.

El modelo híbrido ARIMAX + XGBoost supera significativamente a los enfoques convencionales en términos de precisión y adaptabilidad, consolidándose como una herramienta poderosa para la predicción en entornos reales donde la combinación de factores internos y exógenos es determinante.

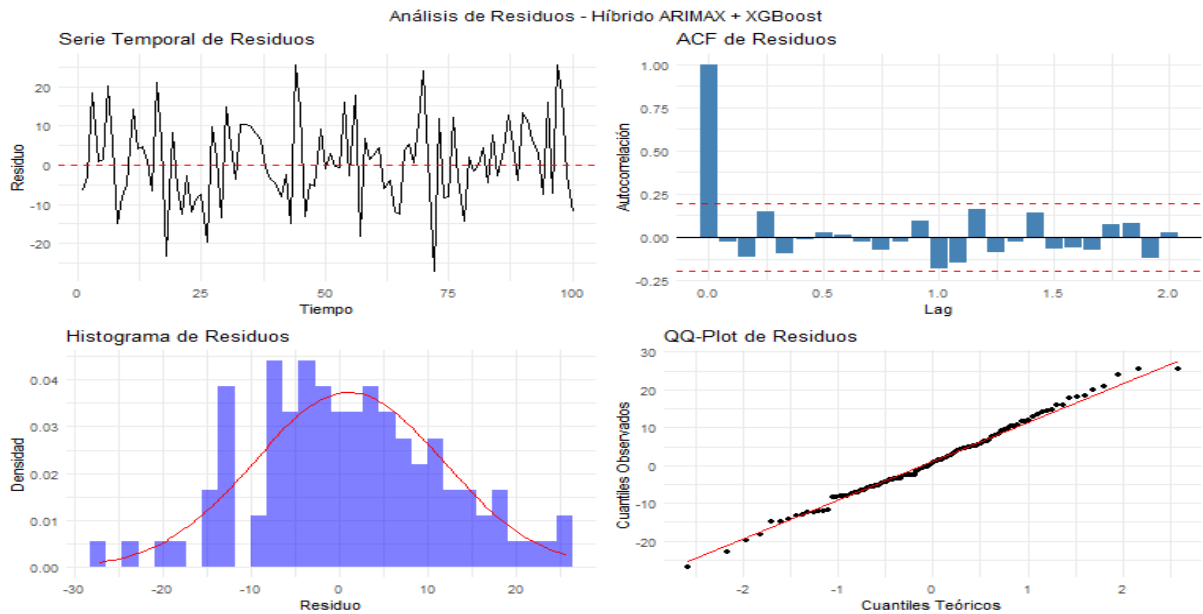
### Figura 9

*Predicción del modelo ARIMAX + XGBoost*



**Figura 10**

*Análisis residual del modelo híbrido ARIMAX + XGBoost*



**Tabla 7**

*Prueba de Ljung-Box. residuos Híbrido ARIMAX + XGBoost*

Prueba	Valor Estadístico	Grados de Libertad (df)	P-Valor
Prueba de Ljung-Box	10.583	12	0.5649

**Tabla 8**

*Análisis de la influencia de las variables en el modelo ARIMAX y SARIMAX*

Variable	Coefficiente SARIMAX	Coefficiente ARIMAX
Temperatura	0.5201	0.4581
Precipitación	-0.0947	-0.1567
Tonelada Métrica	0.0293	0.0360

Comparación de parámetros ARIMAX según Criterios de Información de Akaike (AIC) y Error Cuadrático Medio (MSE) en serie temporal precio promedio de cacao en Ecuador.

**Tabla 9***Métricas de mejores parámetros en modelo ARIMAX*

<b>Modelo</b>	<b>AIC</b>	<b>MSE</b>
ARIMAX (3,1,2)	<b>1274.16</b>	<b>19.21657</b>
ARIMAX (3,2,1)	1275.55	19.07802
ARIMAX (2,1,2)	1274.91	20.82532
ARIMAX (2,2,1)	1284.55	19.34894
ARIMAX (2,0,0)	1282.86	22.80251
ARIMAX (4,0,0)	1275.67	25.28468
ARIMAX (3,0,1)	1279.16	25.08801
ARIMAX (4,2,0)	1304.41	38.43842

Comparación de parámetros SARIMAX según Criterios de Información de Akaike (AIC) y Error Cuadrático Medio (MSE) en serie temporal precio promedio de cacao en Ecuador

**Modelo 2 SARIMAX SARIMAX (2,1,2) (1,1,0) [12]**

**Tabla 10***Comparación de modelos SARIMAX*

<b>Modelo</b>	<b>AIC</b>	<b>MSE</b>
SARIMAX (1,1,1) (0,1,1) [12]	1233.066	21.44423
SARIMAX (2,1,2) (1,1,0) [12]	1246.462	12.60375

Aunque el SARIMAX (1,1,1) (0,1,1) [12] tiene un AIC más bajo, lo que podría indicar un mejor ajuste en términos de penalización por la complejidad del modelo, el SARIMAX (2,1,2) (1,1,0) [12] tiene un mejor rendimiento en términos de MSE, lo que sugiere que este modelo realiza predicciones más precisas en general.

El modelo ARIMAX (3,1,2) ajustado en este estudio muestra una adecuada representación de la serie temporal diferenciada, ya que los residuos no presentan

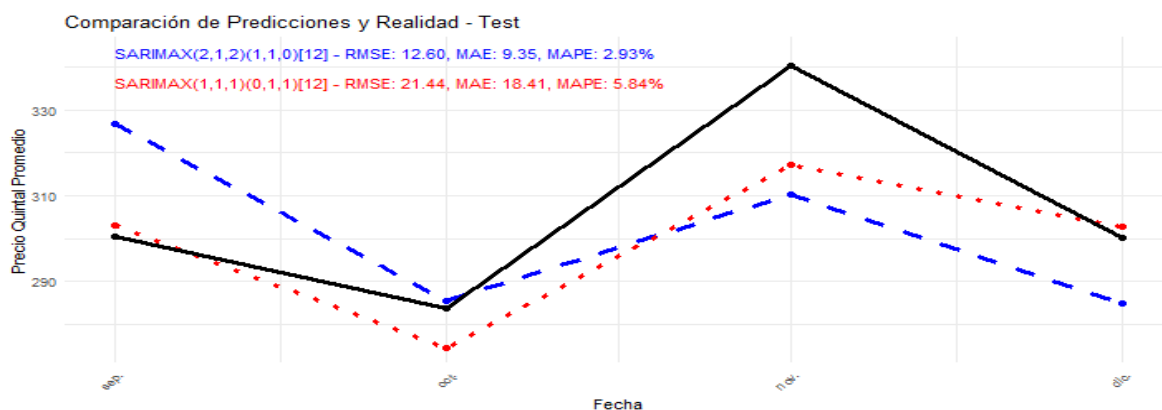
autocorrelaciones significativas en las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF). Además, los residuos se distribuyen de manera aleatoria alrededor de cero, lo que indica que el modelo ha capturado correctamente la estructura de los datos.

El trabajo de Elnaeem et al., (2024) presentó un enfoque sistemático para seleccionar y validar modelos ARIMA en el pronóstico del consumo de electricidad. Su metodología incluyó la transformación de la serie temporal para garantizar su estacionariedad, mediante diferenciaciones y transformaciones logarítmicas para estabilizar la varianza. Posteriormente, utilizaron las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) para identificar el orden óptimo de los componentes del modelo ARIMA (p, d, q), lo que permitió seleccionar el modelo más adecuado para los datos. En su estudio, se optó por un modelo ARIMA (5,0,0), y las pruebas de Ljung-Box confirmaron que los residuos eran ruido blanco, sin autocorrelaciones significativas y con una distribución normal. Esto sugiere que ambos modelos cumplen con los criterios básicos de validez en la modelización de series temporales.

Sin embargo, la elección del orden del modelo puede depender del enfoque utilizado para la identificación. Mientras que en este estudio se determinó que un ARIMAX (3,1,2) era adecuado, en el estudio citado se optó por un ARIMA (5,0,0). Esto resalta la importancia de considerar diferentes herramientas de diagnóstico al seleccionar el modelo más apropiado, según el contexto de los datos analizados.

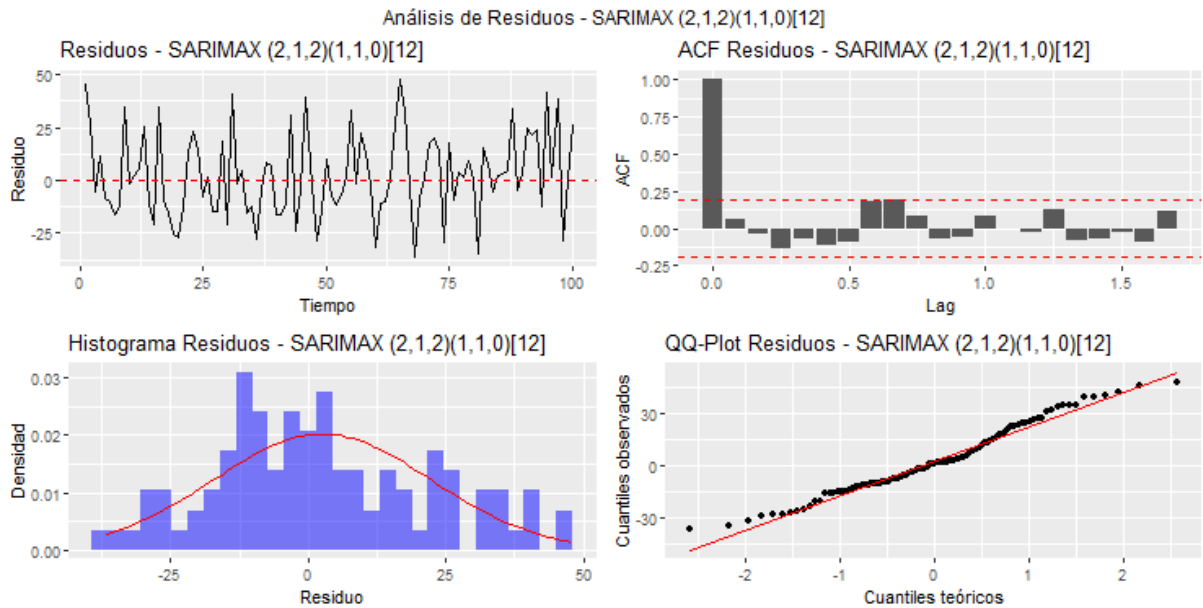
## Figura 11

### Predicción del diseño SARIMAX



**Figura 12**

*Análisis residual del modelo SARIMAX*



**Tabla 11**

*Prueba de Ljung-Box. residuos SARIMAX*

Prueba	Valor Estadístico	Grados de Libertad (df)	P-Valor
Prueba de Ljung-Box	15.135	12	0.2342

**Influencia de las variables exógenas en el modelo ARIMAX Y SARIMAX**

**Temperatura:** Mostró un coeficiente positivo de (0.4581) (0.5201). Esto sugiere que un aumento en la temperatura podría asociarse a un ligero incremento en el precio local, posiblemente reflejando impactos en la oferta agrícola, aunque su efecto es menos pronunciado y su error estándar es relativamente alto.

En el presente análisis, se encontró un coeficiente positivo (0.4581) (0.5201) entre temperatura y precio local del cacao, lo que sugiere que un aumento moderado de la temperatura podría asociarse a un ligero incremento en los precios. Esta relación puede explicarse en el contexto de la sensibilidad climática del cacao, documentada por Etaware (2023) donde se evidencia que el cambio climático ha permitido el establecimiento del cultivo en nuevas regiones fuera del cinturón tradicional (20°N-20°S), como en Sudáfrica. Sin embargo, aunque las temperaturas son ahora más

adecuadas, persisten limitaciones hídricas y desafíos fitosanitarios, lo que genera riesgos en la producción. Estos factores, sumados al estrés térmico sobre los cultivos tradicionales, tienden a reducir la oferta disponible de cacao en el mercado, impulsando de manera moderada el aumento de precios.

**Precipitación:** Registró un coeficiente negativo de (-0.1567) (-0.0947), indicando que un incremento en las precipitaciones tendería a reducir el precio local. Esto podría deberse a mejores condiciones de producción bajo ciertos rangos de lluvias, generando mayor oferta y presionando a la baja los precios.

El coeficiente de (-0.1567) (-0.0947) refleja la relación negativa entre la precipitación y el precio del cacao. Esto sugiere que, aunque las lluvias son necesarias para la producción de cacao, su impacto en los precios es complejo. En condiciones normales de la época lluviosa, las precipitaciones favorecen la producción, lo que genera una mayor oferta en el mercado y, por lo tanto, tiende a reducir el precio debido a la ley de oferta y demanda. Sin embargo, cuando las lluvias son excesivas, pueden provocar condiciones desfavorables como el desarrollo de enfermedades fúngicas (*Phytophthora*, *Monilia*, *Escoba de Bruja*), que afectan la calidad de la cosecha, disminuyendo la oferta y aumentando los precios. Como señala Debenham (2024), aunque el cacao necesita lluvias para su desarrollo, el exceso de humedad puede generar problemas de salud en las plantas y aumentar la volatilidad del mercado. Además, fenómenos climáticos como El Niño y La Niña, que alteran las precipitaciones, también contribuyen a esta fluctuación de precios

**Precio de la tonelada métrica:** Presentó un coeficiente positivo de (0.0360) (0.0293). Esto indica que, manteniendo constantes las demás variables, un incremento en el precio internacional tiende a elevar el precio local. Su influencia, aunque moderada en magnitud, es estadísticamente consistente con la lógica del mercado.

Segovia (2024) afirma que, desde enero de 2024, el precio internacional del cacao se disparó, alcanzando niveles históricos de hasta USD 9.649 por tonelada métrica, superando incluso al precio del cobre. Esta subida se explica por la caída en la producción de los principales países productores (Costa de Marfil y Ghana), afectada por enfermedades de los cultivos y eventos climáticos extremos.

En este modelo, el coeficiente positivo (0.0360) indica que, al mantener constantes otras variables, un aumento en el precio internacional de la tonelada métrica impulsa el precio local del cacao. Aunque en este modelo la magnitud es moderada, esta relación es coherente con la dinámica de oferta y demanda del mercado mundial.

### Modelo 3 ARIMAX + RANDOM FOREST

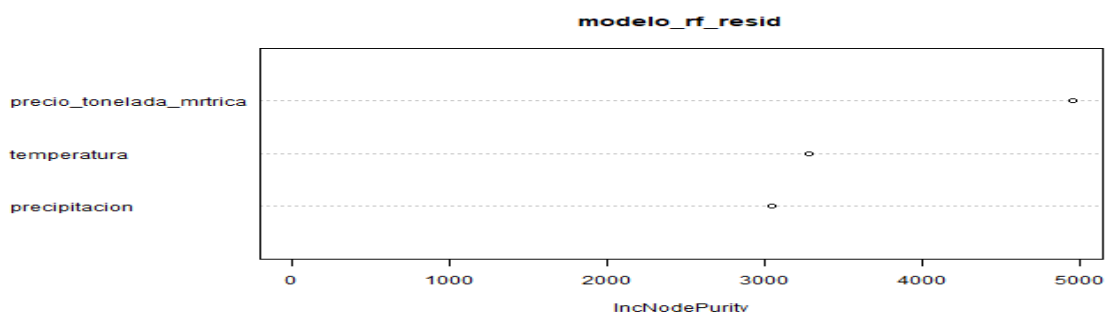
**Tabla 12**

*Híbrido ARIMAX + RANDOM FOREST*

Variable	Importancia
Temperatura	3276.671
Precipitación	3045.533
Precio tonelada métrica	4948.451

**Figura 13**

*Importancia de variables el modelo híbrido ARIMAX + RANDOM FOREST*



#### Precio tonelada métrica

Con una importancia de 4948.451, es claramente la variable más influyente en el modelo. Esto indica que esta variable aporta la mayor cantidad de información para las predicciones o la explicación del comportamiento del modelo.

Tiene una contribución mucho más alta que las otras dos variables, lo que sugiere que el precio por tonelada métrica es el factor principal que impulsa las variaciones del modelo o de la variable objetivo.

## Temperatura

La importancia de temperatura es 3276.671, que es considerablemente alta, pero aún mucho menos que la del precio.

Indica que la temperatura también es una característica relevante que contribuye significativamente a las predicciones, aunque no tan crucial como el precio.

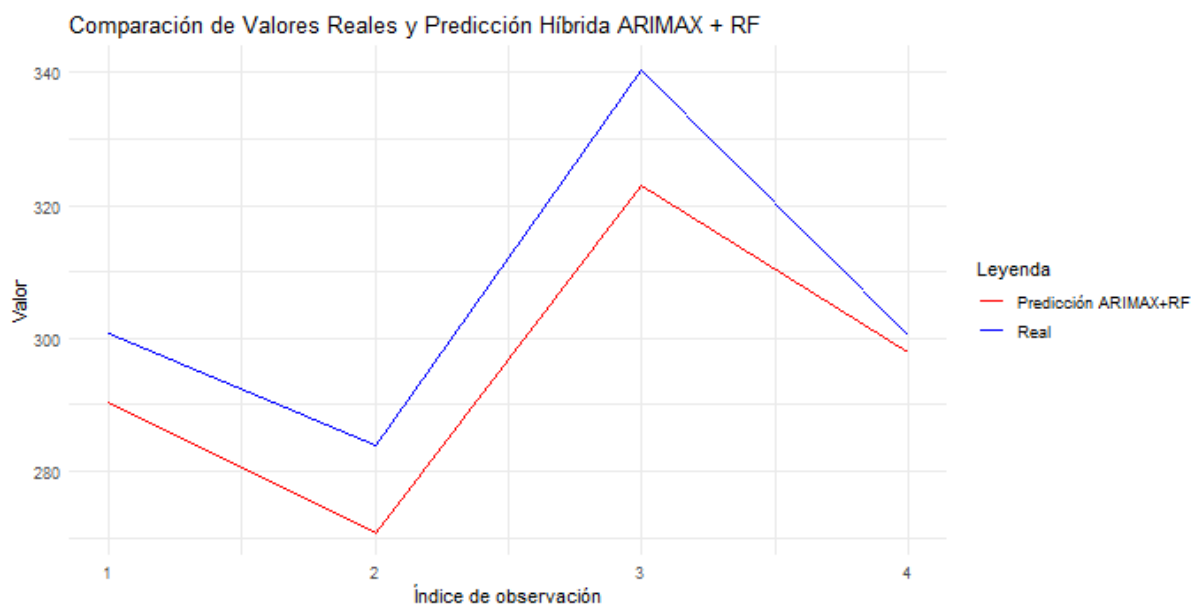
## Precipitación

Con una importancia de 3045.533, la precipitación es la variable menos importante de las tres, pero sigue siendo una contribución considerable.

Su rol es más limitado, pero todavía aporta información útil para la predicción.

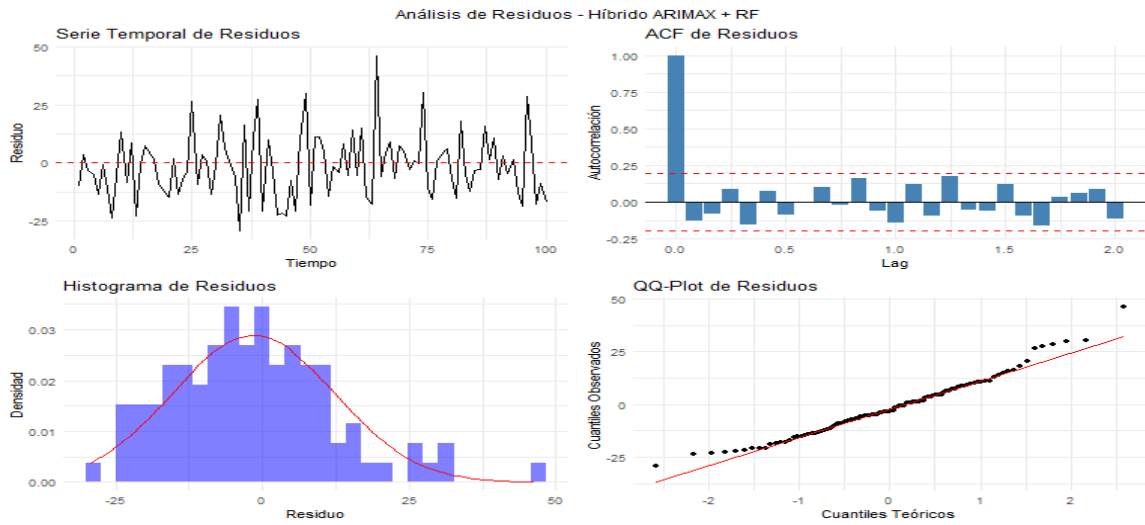
## Figura 14

*Comparación de valores reales y predicción del modelo híbrido ARIMAX + RANDOM FOREST*



**Figura 15**

*Análisis residual del modelo híbrido arimax + random forest*



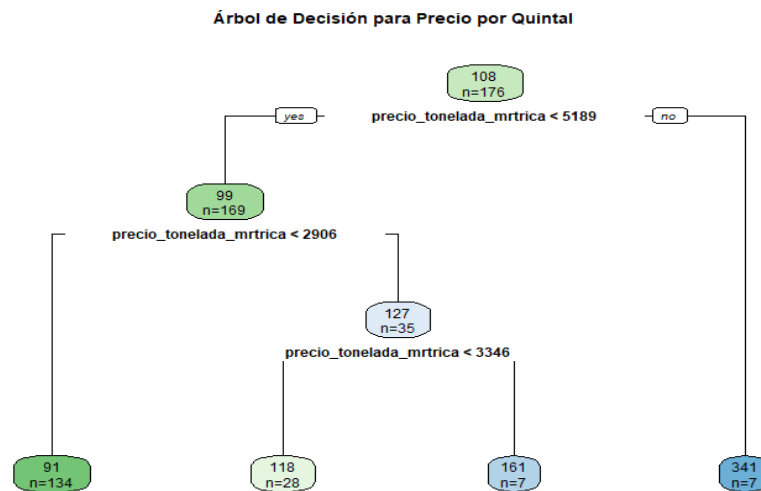
**Tabla 13**

*Prueba de Ljung-Box. residuos Híbrido ARIMAX + RF*

Prueba	Valor Estadístico	Grados de Libertad (df)	P-Valor
Prueba de Ljung-Box	14.035	12	0.2985

**Figura 16**

*Árbol de decisión para el precio del quintal promedio*



**Tabla 14**

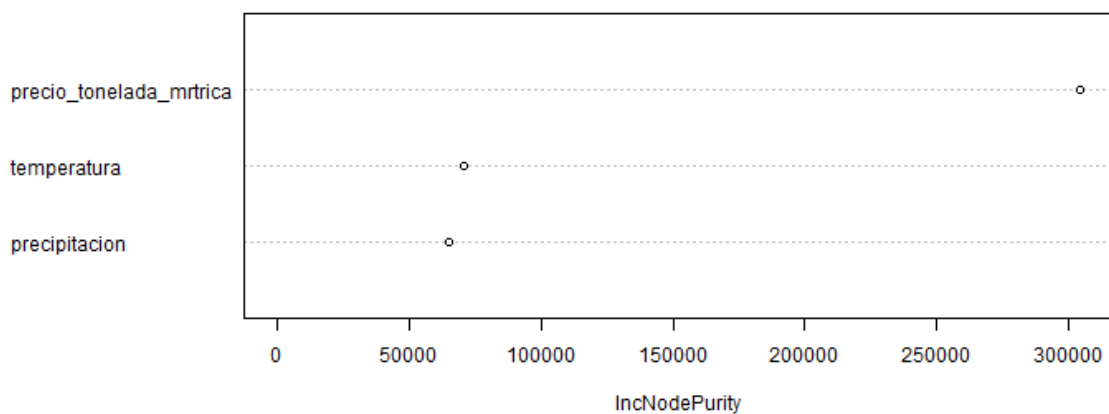
*Resultados del modelo de árbol de regresión para la predicción del Precio Quintal Promedio*

<b>Nodo</b>	<b>Condición sobre tonelada métrica</b>	<b>Numero de observaciones (n)</b>	<b>Precio quintal promedio estimado</b>	<b>Varianza residual</b>	<b>Tipo de nodo</b>
1	Datos de entrenamiento	176	108.28	465,291.30	Nodo raíz
2	< 5188.704	169	98.65	64,469.03	Intermedio
4	< 2906.158	134	91.27*	13,658.30	Terminal
5	>= 2906.158 y < 5188.704	35	126.90	15,577.37	Intermedio
10	< 3602.645	31	120.30*	2,284.71	Terminal
11	>= 3602.645	4	178.05*	1,478.59	Terminal
3	>= 5188.704	7	340.80 *	6,700.59	Terminal

Las variables climáticas temperatura y precipitación no tuvieron efectos en este modelo sobre el precio quintal promedio de cacao en el Ecuador.

**Figura 17**

*Importancia de las variables en modelo Random Forest*



**Tabla 15***Importancia de variable según Random Forest*

<b>Variable</b>	<b>Importancia (IncNodePurity)</b>
Temperatura	71,166.66
Precipitación	64,938.42
Precio tonelada métrica	304,054.60

El modelo Random Forest permitió identificar que las variaciones en el precio de mercado global constituyen el principal determinante del precio local, mientras que las condiciones meteorológicas actúan como factores complementarios en la predicción. En particular, el análisis de la importancia de variables mostró que el precio internacional de la tonelada métrica fue el factor con mayor peso en la explicación del precio del quintal promedio.

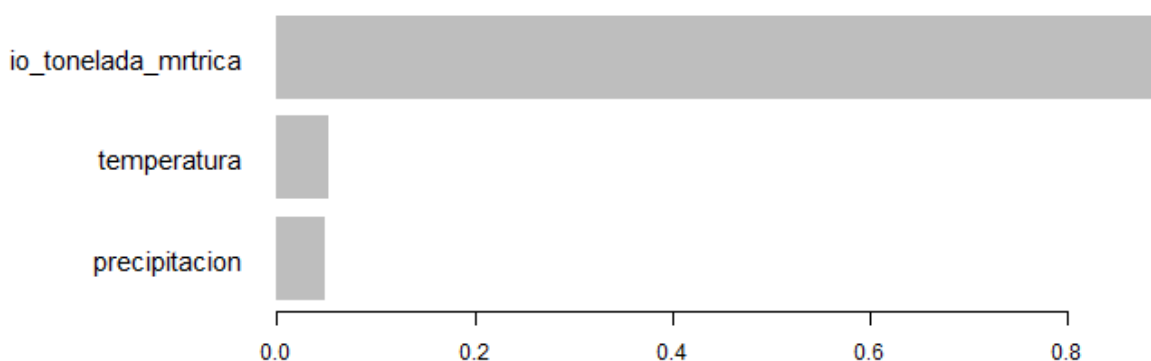
Aunque las variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, también contribuyeron al modelo, su impacto fue considerablemente menor. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar las dinámicas del mercado global como elementos clave en la formulación de estrategias locales de comercialización, reconociendo al mismo tiempo el rol secundario, pero no despreciable, de las condiciones ambientales.

**Tabla 16***Resumen de las métricas de importancia para cada variable Modelo XGBoost*

<b>Variable</b>	<b>Gain</b>	<b>Cover</b>	<b>Frequency</b>
Precio tonelada métrica	0.89758541	0.4537006	0.3108348
Temperatura	0.05285246	0.2255049	0.3007697
Precipitación	0.04956214	0.3207945	0.3883955

**Figura 18**

*Importancia de variables según modelo XGBoost*



En el modelo XGBoost, la importancia de las variables se mide con Gain, Cover y Frequency. En los tres casos, la variable precio por tonelada métrica es la más destacada, pues aporta la mayor mejora al modelo

Al igual que en el análisis realizado con el modelo Random Forest, el modelo XGBoost también identificó que las variaciones en el precio de la tonelada métrica son el principal determinante del precio local. Sin embargo, en este caso, las condiciones meteorológicas, aunque influyeron en las predicciones, tuvieron un impacto menor. En concreto, el análisis de la importancia de variables reveló que el precio internacional de la tonelada métrica sigue siendo el factor dominante en la explicación del precio del quintal promedio.

A pesar de que las variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, también contribuyeron al modelo, su influencia fue considerablemente más baja, con valores de importancia de 0.05285246 para la temperatura y 0.04956214 para la precipitación. Estos resultados coinciden en gran medida con los hallazgos previos, reafirmando la relevancia de considerar las dinámicas del mercado global como un elemento clave en la formulación de estrategias de comercialización, mientras que las condiciones ambientales juegan un papel secundario.

**Tabla 17***Resumen Comparativo de modelos aplicados*

<b>Modelo</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>MAPE</b>
1. Híbrido ARIMAX + XGBoost	7.253439	5.271518	1.773404
2. SARIMAX (2,1,2) (1,1,0) [12]	12.603750	9.348562	2.930547
3. Híbrido ARIMAX + RANDOM FOREST	13.389147	10.866403	3.405202
4. Arimax (3,1,2)	20.82532	17.691354	5.708161
5 SARIMAX (1,1,1) (0,1,1) [12]	21.444230	18.405388	5.839770
6.Híbrido ARIMAX + NN Red Neuronal	24.051268	22.848313	7.345749
7. Híbrido ARIMAX + LSTM	24.073887	22.876577	7.356544
8. Arimax	24.113600	22.899600	7.360000
9. Híbrido ARIMAX + SVM	24.283194	21.381087	6.804498
10. XGBoost	25.01100	19.094813	6.033190

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

- Los resultados muestran que, si bien el cacao CCN51 ofrece alta productividad, el cacao Fino de Aroma logra mayor valor económico cuando se aplican prácticas adecuadas de fermentación. Es necesario implementar incentivos y estrategias que promuevan la fermentación correcta para mejorar la calidad del producto y acceder a mercados premium, equilibrando y mejorando la rentabilidad con sostenibilidad.
- El fenómeno creciente del precio del cacao que tiene un impacto económico significativo a nivel nacional e internacional, su producción y comercio están sujetos a variaciones tanto locales como globales. En este sentido, las decisiones de mercado, las tendencias de exportación y la relevancia de actores internacionales como Estados Unidos e Indonesia, así como los cambios en la demanda europea, son factores clave que deben considerarse para entender y fortalecer la posición de Ecuador como uno de los principales exportadores de cacao.
- El modelo híbrido ARIMAX + XGBoost demostró ser el más preciso para el pronóstico del precio promedio del cacao en Ecuador, destacándose sobre los demás modelos evaluados. Esto confirma que la integración de modelos tradicionales de series de tiempo con técnicas de aprendizaje automático puede mejorar significativamente la calidad de las predicciones.
- Los modelos híbridos basados en aprendizaje automático superaron a los modelos econométricos tradicionales, aunque la efectividad varió entre enfoques. El modelo ARIMAX + XGBoost sobresalió frente a otros híbridos como ARIMAX + Random Forest, ARIMAX + LSTM y ARIMAX + SVM, evidenciando la importancia de seleccionar adecuadamente el método de aprendizaje automático para obtener predicciones más precisas.

## **Recomendaciones**

La mejora de la rentabilidad y sostenibilidad del cacao requiere implementar capacitaciones en técnicas de fermentación, establecer incentivos económicos para agricultores, promover certificaciones de calidad, invertir en investigación y desarrollo, y realizar estudios que resalten las ventajas del cacao Fino de Aroma bien fermentado.

Ecuador debe fortalecer la posición de sus principales provincias productoras en el mercado internacional del cacao mediante el monitoreo de precios, la diversificación de mercados y alianzas estratégicas con Estados Unidos y Europa. Esto permitirá a agricultores y asociaciones tener mayor seguridad en el precio para invertir en nuevas plantaciones.

Se recomienda priorizar el uso de modelos híbridos que integren técnicas econométricas con algoritmos de aprendizaje automático, como el ARIMAX + XGBoost, para la predicción del precio del cacao en Ecuador. Este enfoque combina la capacidad del ARIMAX para capturar patrones lineales y estacionales con la habilidad de XGBoost para modelar relaciones no lineales y complejas, lo que resulta en una mejora significativa en la precisión de las predicciones.

## REFERENCIAS

- Ahene, C., Alu, A., & Mehrotra, R. (2022). Abnormal pricing in international commodity trading: Evidence from Ghana. *International economics*, 172, 331-348. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2022.01.002>
- Al Mamun, M. A., Nihad, S. A. I., Sarkar, M. A. R., Sarker, M. R., Skalicka, J., & Skalicky, M. (2023). Spatio-temporal variability of climatic variables and its impacts on rice yield in Bangladesh. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1290055.
- Alexandrov, T., Bianconcini, S., Dagum, E. B., Maass, P., & McElroy, T. S. (2012). A review of some modern approaches to the problem of trend extraction. *Econometric Reviews*, 31(6), 593-624.
- Alharbi, F. R., & Csala, D. (2022). A seasonal autoregressive integrated moving average with exogenous factors (SARIMAX) forecasting model-based time series approach. *Inventions*, 7(4), 94.
- Asociación Nacional de Exportadores de Cacao. (2024). (2024). *Revista Anecacao, edición 27. Asociación Nacional de Exportadores e Industriales de Cacao del Ecuador*. <https://anecacao.com/wp-content/uploads/2024/01/REVISTA-ANECACAO-enero-2024.pdf>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador 2008*. [https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4\\_ecu\\_const.pdf](https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf)
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2011). *Proyecto de Ley Orgánica de Desarrollo Agropecuario Sostenible y Bienestar Animal (LODA)*. <https://participa.asambleanacional.gob.ec/legislation/processes/89>.
- Asociación Nacional de Exportadores de Cacao. (2024). *Por qué subieron los precios del cacao y qué significa para los amantes del chocolate*. <https://anecacao.com/por-que-subieron-los-precios-del-cacao-y-que-significa-para-los-amantes-del-chocolate/>
- Avadí, A. (2023). Environmental assessment of the Ecuadorian cocoa value chain with statistics-based LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(11), 1495-1515.
- Badillo-Lema, K., Teneda-Llerena, W., & Santamaría-Freire, E. (2023). El comportamiento de los precios de venta del cacao (*Theobroma cacao* L) en la Provincia de los Ríos, Ecuador. *593 Digital Publisher CEIT*, 8(2), 5-17. <https://doi.org/10.33386/593dp.2023.2.1656>
- Banco Central del Ecuador. (2024a). *La economía ecuatoriana reportó un crecimiento interanual de 0,4% en el tercer trimestre de 2023*. [Comunicado de prensa]. <https://www.bce.fin.ec/boletines-de-prensa-archivo/la-economia-ecuatoriana-reporto-un-crecimiento-interanual-de-0-4-en-el-tercer-trimestre-de-2023>

- Banco Central del Ecuador. (2024b). *Boletín analítico trimestral de comercio exterior*. [Informe]. [https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorExterno/ComercioExterior/informes/ResultCE\\_042024.pdf](https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorExterno/ComercioExterior/informes/ResultCE_042024.pdf)
- Beas, S. R. A., López, C. E. F., Méndez, M. C. G., & Osorio, A. P. H. (2023). Aplicación de un Modelo de Series de Tiempo para el pronóstico de la Tasa de Inflación del Perú. *Economía & Gestión Chaninchaatsiq*, 1(1), Pág. 65-80. <https://doi.org/10.32911/egc.2023.v1.n1.1090>
- Becker, A. (2024, 3 de marzo). *¿A quién benefician los precios récord del cacao? DW*. <https://www.dw.com/es/a-qui%C3%A9n-benefician-los-precios-r%C3%A9cord-del-cacao/a-68694258>
- Bennett, C., Stewart, R. A., & Lu, J. (2014). Autoregressive with exogenous variables and neural network short-term load forecast models for residential low voltage distribution networks. *Energies*, 7(5), 2938-2960.
- Bermúdez, S., Voora, V., & Larrea, C. (2022). *Global market report: Coffee prices and sustainability*. [Informe]. <https://www.iisd.org/publications/report/2022-global-market-report-coffee>
- Box, G., & Jenkins, G. M. (1970). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. (2.<sup>a</sup> ed.). Holden-Day.
- Caicedo, C., Pérez, D., Abad, J., & Gallar, D. (2023). Agroecology as a means to improve energy metabolism and economic management in smallholder cocoa farmers in the Ecuadorian Amazon. *Sustainable Production and Consumption*, 41, 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.08.005>
- Camacho, F. R., & Bajaaná, Y. S. (2020). Impacto de la inversión extranjera directa en el crecimiento económico. Caso de estudio Ecuador, período 1996-2016. *Revista Espacios*, 41(17).
- Cámara de Comercio de Quito. (2024). *El cacao: Entre la crisis y la oportunidad*. <https://ccq.ec/el-cacao-entre-la-crisis-y-la-oportunidad/>
- Cambisaca-Díaz, M., & Macías-Badaraco, K. (2023). Competitividad de las exportaciones de cacao en Ecuador 2015–2020. *Revista Económica*, 11(1), 83-91.
- Chatfield, C., & Xing, H. (2019). *The Analysis of Time Series: An Introduction with R* (7th ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781351259446>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining. 785-794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Choque, C., Yarleque, M. V., & Castro, J. D. R. S. (2021). Análisis univariante para describir y pronosticar la producción de plátano en la región de Piura.

- Comité Europeo para la Formación y la Agricultura. (2024). Cacao. Comité Europeo para la Formación y la Agricultura. <https://cefaecuador.org/productos/cacao/>
- Debenham, N. (2024). *What can weather tell us about cocoa price risk? CZ App*. <https://www.czapp.com/analyst-insights/what-can-weather-tell-us-about-cocoa-price-risk/>
- Dimkpa, C., Adzawla, W., Pandey, R., Atakora, W. K., Kouame, A. K., Jemo, M., & Bindraban, P. S. (2023). Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa: an overview of soil health implications. *Frontiers in Soil Science*, 3, 1123931.
- Dong, J., Zeng, W., Wu, L., Huang, J., Gaiser, T., & Srivastava, A. K. (2023). Enhancing short-term forecasting of daily precipitation using numerical weather prediction bias correcting with XGBoost in different regions of China. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, 105579.
- El Oriente. (2025, 13 de febrero). *El cacao fue el tercer producto no petrolero de exportación en 2024*. <https://www.eloriente.com/articulo/el-cacao-fue-el-tercer-producto-no-petrolero-de-exportacion-en-2024/49225>
- Elnaeem Balila, A., & Shabri, A. B. (2024). Comparative analysis of machine learning algorithms for predicting Dubai property prices. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 10, 1327376.
- Etaware, P. M. (2023). Critical evaluation of the agro-ecological system of the Republic of South Africa (30°S) in response to unclassified claims of cocoa farming beyond 20°S of the equator. *PLOS ONE*, 18(8), e0289873. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289873>
- Fair, R. C. (2019). Information content of DSGE forecasts. *Journal of Forecasting*, 38(6), 519-524.
- Fairtrade International. (2022). *Fairtrade Standard for Cocoa*. [https://www.fairtrade.net/content/dam/fairtrade/fairtrade-international/standards-spo-cocoa/Cocoa\\_SPO\\_EN.pdf](https://www.fairtrade.net/content/dam/fairtrade/fairtrade-international/standards-spo-cocoa/Cocoa_SPO_EN.pdf) fairtrade.net
- Ferrán, M., & Escot, L. (2019). Una propuesta metodológica para el análisis gráfico de series temporales regionales: una aplicación a las tasas de paro provinciales en España. *Investigaciones Regionales - Journal of Regional Research*, (43), 57-81.
- García, A., Pico, B. & Jaimez, R., (2021). La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción. *Novasinerгия*. 4(2). 152-172. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.10>

- Gong, Q., & Tang, W. (2025). How Digital Technology Innovation Drives Agricultural Sustainability? A Mechanism Study Based on Green Total Factor Productivity. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1660992.
- Hidalgo, F. (2020). Agriculturas campesinas familiares y sostenibilidad del cacao fino de aroma en Ecuador. *Cacao y campesinos: experiencias de producción e investigación*. 117-138.
- Holt, C. C. (2004). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International journal of forecasting*, 20(1), 5-10.
- Huang, A., & Huang, S. Y. (2023). Use of feature importance statistics to accurately predict asthma attacks using machine learning: A cross-sectional cohort study of the US population. *PLOS ONE*, 18(11), e0288903. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288903>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: principles and practice. OTexts*.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2021). *Temperatura media mensual de las principales estaciones meteorológicas de Ecuador*. [Conjunto de datos]. [Datos Abiertos Ecuador. https://datosabiertos.gob.ec/dataset/temperatura-media-mensual](https://datosabiertos.gob.ec/dataset/temperatura-media-mensual)
- International Cocoa Organization. (2024). *5 edición de la Conferencia Mundial del Cacao—Declaración de Bruselas 24/04/2024*. <https://www.icco.org/conferencia-mundial-del-cacao-2024-declaracion-de-bruselas/>
- Investing.com. (2012). *US Cocoa futures price today (USD/metric ton)*. *Investing.com*. <https://es.investing.com/commodities/us-cocoa>
- International Organization for Standardization. (2019). *Sustainable and traceable cocoa. Part 2: Requirements for performance (related to economic, social and environmental aspects)*. (ISO 34101-2:2019). ISO, Ginebra, Suiza.
- Jaimez, R. E., Barragan, L., Fernández-Niño, M., Wessjohann, L. A., Cedeño-García, G., Cantos, I. S., & Arteaga, F. (2022). Theobroma cacao L. cultivar CCN 51: A comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects. *PeerJ*, 10, e12676. <https://doi.org/10.7717/peerj.12676>
- Karetin, N., Molodetskikh, I., Vatolin, D., Timofte, R., Yang, Y., Chen, J., ... & Wu, G. (2025). AIM 2025 challenge on robust offline video super-resolution: Dataset, methods and results. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 5615-5623).
- López, M. (2025, abril 16). *El cacao ecuatoriano, líder en exportaciones 2025*. *Camae*. <https://www.camae.org/sin-categoria/el-cacao-ecuatoriano-lider-en-exportaciones-2025/>

- LukerChocolate. (2024). *Volatilidad de los precios del cacao y su impacto*. <https://lukerchocolate.com/es/base-de-conocimiento/volatilidad-de-los-precios-del-cacao-y-su-impacto>
- Mahmoud, S. (2023). Forecasting agricultural price volatility of some export crops in Egypt using ARIMA/GARCH model. *Review of Economics and Political Science*, 8(2), 123-133.
- Majka, M. (2024, September). *ARIMAX time series forecasting with external variables*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/384196976\\_ARIMAX\\_Time\\_Series\\_Forecasting\\_with\\_External\\_Variables](https://www.researchgate.net/publication/384196976_ARIMAX_Time_Series_Forecasting_with_External_Variables)
- Makogin, V., Oesting, M., Rapp, A., & Spodarev, E. (2021). Long range dependence for stable random processes. *Journal of Time Series Analysis*, 42(2), 161-185.
- Manalu, R. (2019). Pengolahan biji kakao produksi perkebunan rakyat untuk meningkatkan pendapatan petani [Processing of smallholder plantations cocoa production to increase farmers income]. *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Pembangunan*, 9, 99-112. <https://doi.org/10.22212/JEKP.V9I2.1006>
- Mansur, H. A., Harini, N., Saati, E. A., Damat, D., Warkoyo, W., Sukardi, S., Wahyudi, V. A., Anggriani, R., Siskawardani, D. D., Husna, A., Putri, D. N., Nur, N., & Lestari, A. (2023). Effectiveness of public service program related cocoa fermentation sop in increasing the knowledge of cocoa farmer. *Journal of Community Service and Empowerment*, 4(3), 636-643. <https://doi.org/10.22219/jcse.v4i3.26038>
- Maronna, R. A., Martin, R. D., Yohai, V. J., & Salibián-Barrera, M. (2019). Time series.
- Mendoza, EY, Escobar, H., Boza, J, y Tachong, L. (2022). Exportación de cacao en tiempos de la pandemia de COVID-19 y su impacto en la cadena de valor. *Journal of Business and Entrepreneurial Studie*, 6 (4). <https://doi.org/10.37956/jbes.v6i4.316>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2025). *Precios promedio mensuales de agroindustrias correspondientes a molinos empresariales* [Conjunto de datos]. Dirección de Análisis y Procesamiento de la Información, Ecuador. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-descargas/estadisticas-economicas>
- Mora, F. C., Meléndez, V. P., Torres, L. A., González, G. I. R., & Otiniano, A. M. J. (2023). Evaluación de la sostenibilidad de fincas productoras de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el cantón Pueblo Viejo de la provincia de Los Ríos, Ecuador: SUSTENTABILIDAD CACAO. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 28(2), 299-328. <https://doi.org/10.32480/rscp.2023.28.2.298>
- Moreno, C., Molina, I., Miranda, Z., Moreno, R., & Moreno, P. (2020). The cocoa value chain in Ecuador: proposal of strategies to support sustainability. *Bioagro*, 32(3), 205-214.

- Niu, Y., Li, J., & Xia, X. (2024). Research on the impact of agricultural production outsourcing on farmers' fertilizer application intensity: an inverse U-shaped relationship. *Agriculture*, *14*(10), 1719.
- Rahman, M. S., Chowdhury, A. H., & Amrin, M. (2022). Accuracy comparison of ARIMA and XGBoost forecasting models in predicting the incidence of COVID-19 in Bangladesh. *PLOS global public health*, *2*(5), e0000495. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0000495>
- Segovia, D. (2024, 26 marzo). *¡Récord! La tonelada de cacao llegó a los US\$ 9.649*. Forbes Ecuador. <https://www.forbes.com.ec/today/record-tonelada-cacao-llego-us-9649-n49900>
- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2006). Time series analysis and its applications: with R examples. New York, NY: Springer New York.
- Tao, H., Al-Khafaji, Z. S., Qi, C., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Tiyasha, T., ... & Yaseen, Z. M. (2021). Artificial intelligence models for suspended river sediment prediction: state-of-the art, modeling framework appraisal, and proposed future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, *15*(1), 1585-1612.
- Teneda, W. F. (2016). *Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao. (Theobroma cacao L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51*.
- Xia, C. (2024). Comparative analysis of ARIMA and LSTM models for agricultural product price forecasting. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, *85*, 1032–1040. <https://doi.org/10.54097/8q6nx369>
- Zambrano, G., Tennhardt, L. M., Egger, M., Ramírez, K., Santos, A., Moyano, B., & Curran, M. (2024). Differing impacts of the COVID-19 pandemic on farmers and intermediaries: insights into the Ecuadorian cocoa value chain. *Agricultural and Food Economics*, *12*(1), 9.
- Zhou, J., Yu, H., Qing, P., Chen, D., Huang, S., Jin, Y., ... & Chen, Y. (2025). Interfacial double-coordination effect reconstructing anode/electrolyte interface for long-term and highly reversible Zn metal anodes. *Journal of Colloid and Interface Science*, *678*, 772-782.

