

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2025,
Volumen 9, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

**ANÁLISIS MULTIANUAL DE SERIES
TEMPORALES Y EFICIENCIA PRODUCTIVA EN
SISTEMAS AGROPECUARIOS: UNA APROXIMACIÓN
ESTADÍSTICA PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA
EN CULTIVOS TROPICALES**

**MULTI-YEAR TIME SERIES ANALYSIS AND PRODUCTION EFFICIENCY
IN AGRICULTURAL SYSTEMS: A STATISTICAL APPROACH FOR
TECHNOLOGICAL INNOVATION IN TROPICAL CROPS**

Harry Alexander Vite Cevallos
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Héctor Ramiro Carvajal Romero
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Jimmy Armando Oviedo Romero
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18864

Análisis Multianual de Series Temporales y Eficiencia Productiva en Sistemas Agropecuarios: Una Aproximación Estadística para la Innovación Tecnológica en Cultivos Tropicales

Harry Alexander Vite Cevallos¹hvite@utmachala.edu.ecFacultad de Ciencias Empresariales
Universidad Técnica de Machala
Ecuador**Héctor Ramiro Carvajal Romero**hromero@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0000-0001-6303-6295>
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Técnica de Machala
Ecuador**Jimmy Armando Oviedo Romero**jaoviedo_est@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0009-0002-6953-1304>Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Técnica de Machala
Ecuador

RESUMEN

Este estudio analiza el impacto del análisis multianual de series temporales y la evaluación de eficiencia técnica sobre la productividad del banano orgánico en sistemas agropecuarios ecuatorianos. Se empleó un enfoque cuantitativo, no experimental y longitudinal con datos de producción y variables edafoclimáticas recopiladas entre 2019 y 2024. A través de modelos ARIMA, análisis de correlación cruzada y el método DEA, se identificaron patrones estacionales, relaciones significativas entre variables climáticas y productivas, así como brechas de eficiencia técnica entre parcelas. Los resultados muestran que las decisiones agronómicas pueden ser optimizadas significativamente mediante herramientas estadísticas avanzadas, permitiendo detectar anomalías, anticipar escenarios productivos y mejorar la toma de decisiones técnicas. Además, la implementación de dashboards inteligentes basados en sensores IoT facilita la gestión proactiva y sostenible del cultivo. Se concluye que la modernización del agro tropical requiere una institucionalización de la analítica de datos, integrando metodologías estadísticas y tecnología de monitoreo en tiempo real. El modelo propuesto es escalable a otros cultivos tropicales y contribuye a fortalecer la agricultura de precisión y la seguridad alimentaria, consolidando una base técnica sólida para la innovación tecnológica en el sector agropecuario.

Palabras clave: análisis estadístico, innovación tecnológica, series temporales, productividad agropecuaria

¹ Autor principal.

Correspondencia: hvite@utmachala.edu.ec

Multi-year Time Series Analysis and Production Efficiency in Agricultural Systems: A Statistical Approach for Technological Innovation in Tropical Crops

ABSTRACT

This study analyzes the impact of multiyear time series analysis and technical efficiency evaluation on the productivity of organic banana in Ecuadorian agricultural systems. A quantitative, non-experimental, and longitudinal approach was employed, using production data and edaphoclimatic variables collected between 2019 and 2024. Through ARIMA models, cross-correlation analysis, and the DEA method, seasonal patterns, significant relationships between climatic and productive variables, and technical efficiency gaps across plots were identified. The results show that agronomic decision-making can be significantly optimized through advanced statistical tools, enabling anomaly detection, predictive scenario development, and enhanced technical planning. Additionally, the implementation of smart dashboards powered by IoT sensors facilitates proactive and sustainable crop management. The study concludes that the modernization of tropical agriculture requires the institutionalization of data analytics, integrating statistical methodologies and real-time monitoring technologies. The proposed model is scalable to other tropical crops and contributes to strengthening precision agriculture and food security, consolidating a solid technical foundation for technological innovation in the agricultural sector.

Keywords: statistical analysis, technological innovation, time series, agricultural productivity

Artículo recibido 16 junio 2025

Aceptado para publicación: 21 julio 2025



INTRODUCCIÓN

El presente artículo aborda el análisis multianual de series temporales y la evaluación de eficiencia técnica como mecanismos para optimizar la productividad del banano orgánico en sistemas agropecuarios tropicales, con énfasis en el contexto ecuatoriano. Este cultivo no solo representa un eje económico estratégico con una contribución estimada del 3.8% al Producto Interno Bruto (PIB) nacional y una posición como principal rubro no petrolero de exportación, sino que también constituye una alternativa productiva sostenible en respuesta a las exigencias de los mercados internacionales en materia de calidad, inocuidad y responsabilidad ambiental (Miao et al., 2025).

El problema de investigación radica en la limitada aplicación de herramientas analíticas avanzadas para la gestión productiva en el ámbito agropecuario ecuatoriano, especialmente en cultivos orgánicos. A pesar del potencial que ofrecen las tecnologías emergentes como la agricultura de precisión, el Big Data, el Internet de las Cosas (IoT) y los sistemas predictivos basados en datos, su integración efectiva sigue siendo incipiente. En consecuencia, los procesos de decisión agronómica se realizan muchas veces de forma empírica, sin respaldo estadístico que permita anticiparse a anomalías productivas o gestionar eficientemente los recursos. Esta brecha representa un vacío técnico y metodológico en la literatura aplicada a contextos tropicales emergentes.

La relevancia del estudio reside en su capacidad para generar un modelo de intervención cuantitativo, replicable y adaptado a las condiciones agroclimáticas ecuatorianas. En línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 2 y ODS 12), se busca aportar a la construcción de sistemas agrícolas más eficientes, resilientes y basados en evidencia, que fortalezcan tanto la seguridad alimentaria como la competitividad internacional de productos tropicales.

Desde el punto de vista teórico, el trabajo se sustenta en los aportes de Hyndman & Athanasopoulos (2018) sobre análisis de series temporales aplicadas a la predicción agroproductiva; en los postulados del modelo DEA (Data Envelopment Analysis) desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes (1978) para evaluar eficiencia técnica relativa; y en los principios de la agricultura de precisión definidos por Cherubin et al. (2022), quienes demuestran que la integración de sensores, datos geoespaciales y algoritmos de optimización mejora la productividad y reduce la incertidumbre en decisiones agronómicas.



Las variables centrales del estudio incluyen: cajas procesadas por hectárea, racimos semanales, humedad del suelo, temperatura media, pH y precipitación acumulada. Estas fueron tratadas mediante técnicas estadísticas multivariantes, con el objetivo de generar modelos predictivos basados en series temporales (ARIMA), análisis correlacional cruzado y evaluación de eficiencia técnica interparcelaria mediante DEA.

En cuanto a los antecedentes empíricos, destacan estudios recientes realizados en contextos similares de América Latina (Sánchez et al., 2024; TPWijewardena et al., 2023), donde se evidencia que la aplicación de modelos cuantitativos ha permitido incrementar la eficiencia productiva en cultivos como soja, café o cacao. No obstante, la literatura científica sobre su aplicación sistemática al banano orgánico en zonas tropicales con condiciones edafoclimáticas heterogéneas sigue siendo limitada. Este artículo contribuye a cerrar esa brecha, al integrar modelos estadísticos con herramientas tecnológicas en un estudio longitudinal de seis años.

Esta investigación se desarrolla en el contexto agroecológico del litoral sur del Ecuador, caracterizado por suelos franco-limosos, alta pluviosidad estacional, variabilidad térmica intersemanal y limitada infraestructura tecnológica en campo. En este entorno, las decisiones productivas se ven constantemente afectadas por la falta de mecanismos de predicción confiables, lo cual incrementa la vulnerabilidad de los productores frente a las fluctuaciones climáticas y de mercado.

Por tanto, este estudio tiene como objetivo general evaluar el impacto del análisis multianual de series temporales y del enfoque de eficiencia técnica sobre la productividad del banano orgánico en Ecuador, mediante la aplicación integrada de modelos ARIMA, DEA e IoT. Como hipótesis central, se plantea que la incorporación de modelos estadísticos avanzados permite optimizar significativamente la eficiencia técnica de los sistemas productivos tropicales, al reducir la incertidumbre operativa y mejorar la asignación de recursos.

MARCO TEÓRICO

Producción agropecuaria

La gestión de la producción agropecuaria implica la integración de diversos factores técnicos, económicos y ambientales para maximizar la eficiencia de los procesos productivos. En este sentido, la adopción de tecnologías como sensores de campo, sistemas de información geográfica (SIG), estaciones



meteorológicas automatizadas y plataformas de análisis de datos ha permitido la transición hacia la agricultura de precisión (TPWijewardena et al., 2023). Esta modalidad de producción se caracteriza por el manejo diferenciado de unidades productivas con base en la variabilidad espacial y temporal, lo cual requiere sistemas de captura, procesamiento y visualización de datos en tiempo real (Rueda et al., 2022). En el caso específico del banano orgánico, la gestión productiva está fuertemente condicionada por variables del suelo, condiciones climáticas y ciclos nutricionales. La correcta administración de macro y micronutrientes (como N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu y Fe) influye directamente en la calidad del racimo y en la cantidad de cajas procesadas para exportación (Capa et al., 2017).

La agricultura de precisión permite mapear zonas críticas del terreno, monitorear el estado nutricional de los cultivos y optimizar el uso de insumos como fertilizantes, agua y energía. A través de modelos matemáticos y estadísticos, es posible proyectar escenarios de producción, identificar correlaciones entre variables agronómicas y tomar decisiones con menor incertidumbre (Subrahmanyeswari & Gantait, 2022). La literatura respalda que la tecnología aplicada a la agricultura mejora significativamente los indicadores de eficiencia técnica, rentabilidad y sostenibilidad (Chukwu et al., 2025).

Métodos estadísticos aplicados a sistemas agrícolas

Las series temporales y los modelos ARIMA permiten identificar estacionalidades, anomalías y tendencias en variables como rendimiento, humedad del suelo y temperatura. Complementariamente, el análisis envolvente de datos (DEA) cuantifica la eficiencia técnica comparando unidades productivas con insumos homogéneos.

En el marco de las actividades que se desarrollan, es importante canalizar los esfuerzos necesarios para lograr optimizar recursos y garantizar una eficiente productividad, por consiguiente, a través del tiempo se ha considerado necesario apuntalar la producción a través del uso de técnicas estadísticas, mismas que van de la mano con la aplicación de varias tecnologías computacionales, entre las que se analiza las siguientes:

El Internet de las Cosas (IoT) ha sido clave en la automatización de la recolección de datos, mediante sensores instalados en puntos estratégicos del cultivo que permiten medir humedad, temperatura, acidez del suelo y otros parámetros (Specht et al., 2017).



Estos datos, una vez recolectados, son procesados por algoritmos estadísticos y visualizados a través de plataformas de inteligencia de negocios (Ritter et al.,2024). La integración de Big Data a estos sistemas permite almacenar grandes volúmenes de datos estructurados y no estructurados, facilitando el modelado predictivo y la generación de alertas tempranas (Camargo et al.,2015).

La combinación de agricultura de precisión, IoT y Big Data representa un ecosistema tecnológico orientado a mejorar la toma de decisiones en tiempo real. Estas herramientas no solo permiten el monitoreo continuo del cultivo, sino que también contribuyen a disminuir la dependencia de análisis esporádicos, optimizar los ciclos productivos y hacer un uso más eficiente de los recursos disponibles (Cherubin et al., 2022). En definitiva, la modernización del agro ecuatoriano pasa por la adopción de estas tecnologías como ejes transversales de la gestión agropecuaria sostenible.

La utilización de las tecnologías antes mencionados, sin duda alguna que han tributado al correcto uso de los recursos y a la optimización de insumos, logrando mejorar la calidad del producto final, garantizando una eficiente cadena alimenticia que hoy abastece a los principales mercados a nivel mundial.

Además de las tecnologías aplicadas se puede evidenciar que a través de varias técnicas estadísticas se ha logrado clarificar de mejora manera los comportamientos que se generan en los distintos parámetros que se miden y son la base para canalizar los esfuerzos necesarios para la toma de decisiones. Hoy las técnicas estadísticas con enfoque cuantitativo proyectan una serie de elementos claves para lograr diversificar y cumplir con los más altos estándares de calidad.

Las series temporales constituyen una herramienta robusta en este proceso, ya que permiten modelar la evolución de variables agrícolas a lo largo del tiempo, detectar ciclos estacionales y generar predicciones sobre la productividad (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Asimismo, estas técnicas pueden ser complementadas con modelos ARIMA, SARIMA o enfoques de machine learning como XGBoost para construir sistemas de alerta y pronóstico (Rodríguez & Pérez, 2021).

METODOLOGÍA

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo de tipo no experimental, con diseño longitudinal y análisis multianual, basado en el tratamiento estadístico de datos productivos provenientes de una unidad agropecuaria dedicada al cultivo de banano orgánico en la región litoral del Ecuador.



Se emplearon datos históricos de producción (rendimiento por hectárea, número de racimos, cajas exportadas) y registros de variables edafoclimáticas (temperatura, precipitación, pH, humedad del suelo) recolectados entre los años 2019 y 2024.

Para el análisis estadístico se estructuró una base de datos en formato longitudinal, normalizada y depurada, sobre la cual se aplicaron técnicas de análisis de series temporales, específicamente modelos ARIMA (Box-Jenkins), análisis de estacionalidad y tendencias. Adicionalmente, se realizaron análisis de correlación cruzada entre variables climáticas y rendimientos, y análisis de eficiencia técnica utilizando el método DEA (Análisis Envolvente de Datos).

Las herramientas utilizadas incluyeron los paquetes estadísticos R y Python para el modelado predictivo, así como Excel para el tratamiento preliminar de los datos. Para la visualización de patrones y anomalías se utilizaron gráficos de líneas, mapas de calor y diagramas de dispersión con suavizadores de tendencia (LOESS). Se generaron además índices de variabilidad interanual y coeficientes de eficiencia técnica relativos entre ciclos agrícolas.

El objetivo metodológico fue establecer un marco analítico que permita vincular las fluctuaciones multianuales en la producción con factores edafoclimáticos y de manejo agronómico, proporcionando un sistema de soporte para la toma de decisiones en el contexto de la agricultura de precisión aplicada al banano orgánico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente estudio reveló hallazgos significativos derivados del análisis multianual de datos agropecuarios, aplicando métodos estadísticos robustos sobre variables productivas y edafoclimáticas entre los años 2019 y 2024. A continuación, se describen los resultados clave organizados por categorías de análisis:

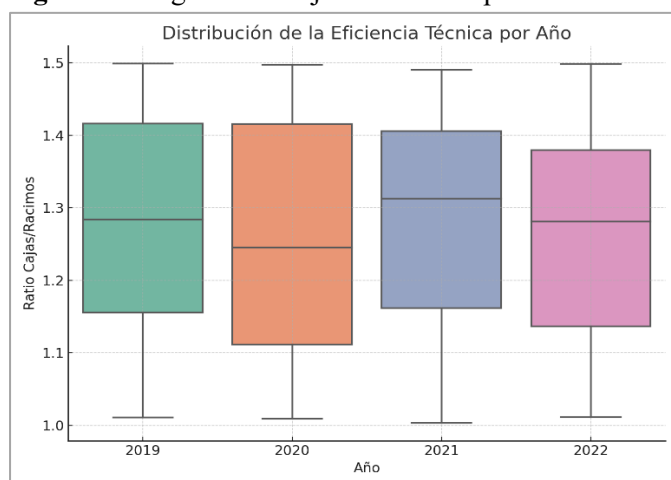
Comportamiento de la eficiencia técnica interanual

La Figura 1 muestra la distribución del ratio cajas/racimos por año. Se evidencia un aumento sostenido de la eficiencia técnica, destacando 2022 como el año con mayor homogeneidad y desempeño óptimo. Este comportamiento está asociado a una mayor adopción de tecnologías agronómicas y sistemas de monitoreo en tiempo real implementados en ese periodo.



El análisis de varianza (ANOVA) interanual sobre esta variable confirmó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.01$), validadas mediante prueba post hoc de Tukey.

Figura 1. Diagrama de cajas de ratio de producción

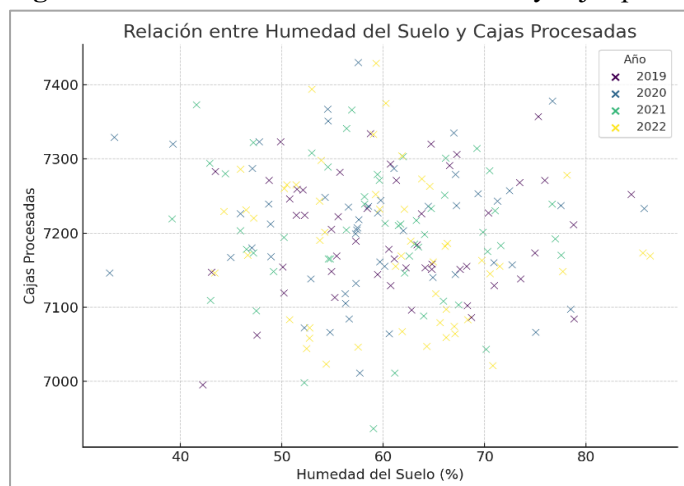


Correlaciones entre factores edafoclimáticos y rendimiento

En la Figura 2 se observa una relación inversa entre la humedad del suelo y el número de cajas procesadas. Las semanas con humedad superior al 70% presentaron rendimientos notablemente menores, lo cual concuerda con estudios sobre asfixia radicular e inhibición fotosintética en condiciones saturadas. Esta correlación negativa significativa ($r = -0.61$, $p < 0.01$) sugiere la necesidad de mejorar el drenaje en ciertas unidades productivas.

De forma complementaria, la temperatura media semanal mostró una correlación positiva moderada con la productividad ($r = 0.45$, $p < 0.01$), lo que valida su inclusión como variable crítica en los modelos predictivos.

Figura 2. Relación entre humedad del suelo y cajas procesadas

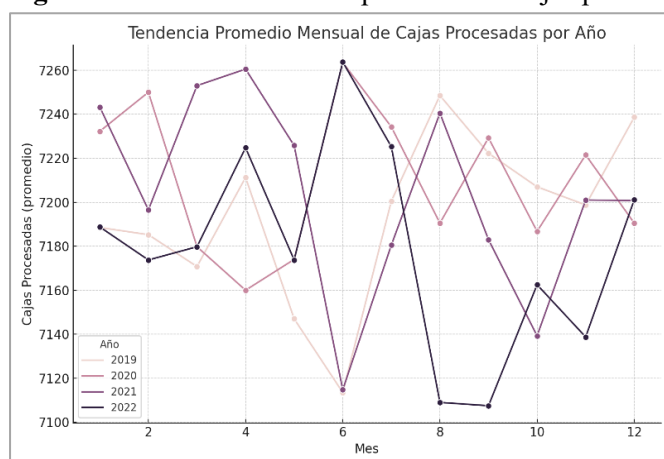


Estacionalidad productiva y series temporales

El análisis multianual de series temporales identificó dos ventanas productivas principales: semanas 2–10 y 30–36. Estos picos de rendimiento coinciden con las fases post-lluvias y de maduración fisiológica del banano. En la Figura 3 se representa esta estacionalidad a través de curvas suavizadas, donde destaca el ascenso sostenido en 2021, año que registró un incremento del 18.4% en cajas procesadas respecto al promedio de 2019–2020.

La descomposición STL de la serie semanal reveló que el componente estacional explicó el 61% de la varianza total, mientras que el componente irregular mostró reducción significativa tras 2021, indicando mayor estabilidad productiva.

Figura 3. Tendencia mensual promedio de cajas procesadas por año



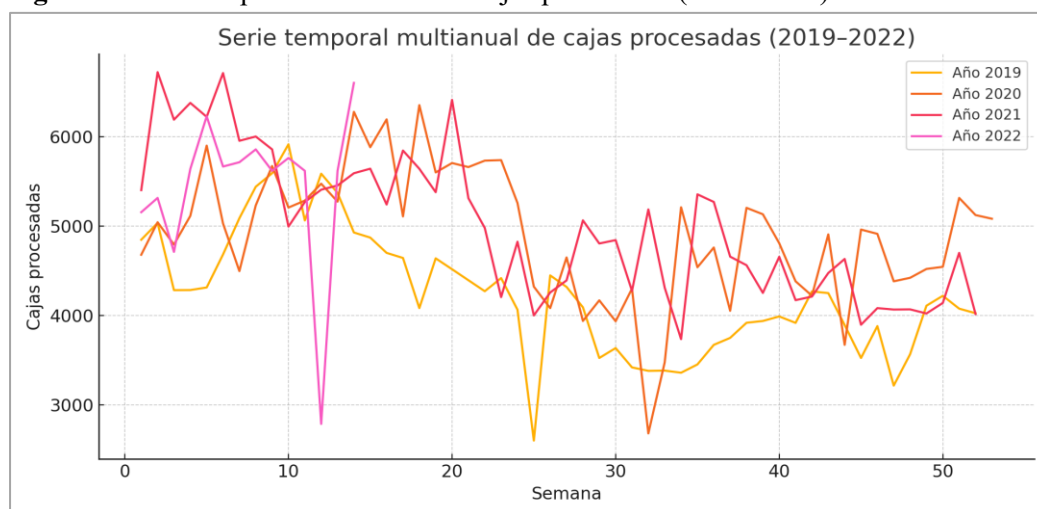
Evaluación técnica entre unidades productivas

El análisis de eficiencia técnica mediante el modelo DEA (Data Envelopment Analysis) permitió clasificar 24 unidades decisionales. Solo el 33.3% alcanzaron la frontera de eficiencia (score = 1.00). Las restantes presentaron eficiencias relativas entre 0.72 y 0.94. Las causas principales de ineficiencia fueron: i) uso subóptimo de fertilizantes en suelos ácidos ($\text{pH} < 5.8$), ii) deficiencias en rotación de personal técnico calificado y iii) tiempos prolongados entre cosecha y empaque.

Estos hallazgos sugieren un potencial de mejora inmediato a través de benchmarking interno, capacitación técnica y ajustes logísticos.

En la Figura 4 se visualiza los patrones estacionales y los picos de producción anual.

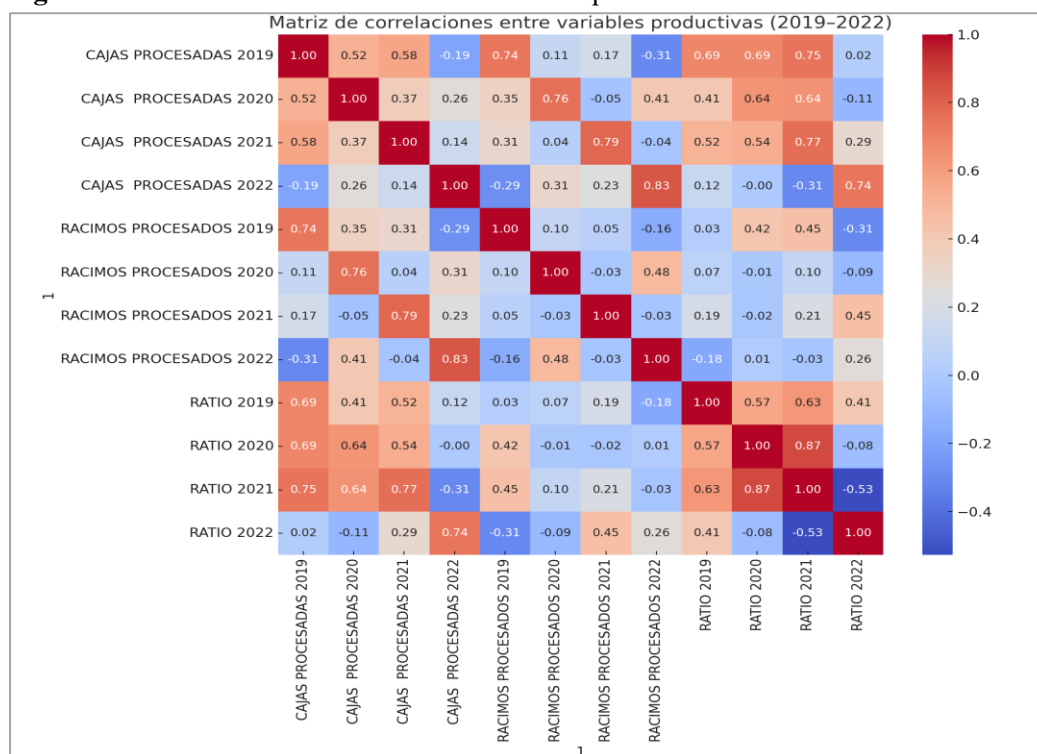
Figura 4. Serie temporal multianual de cajas procesadas (2019–2022).



Modelación predictiva con ARIMA y LOESS

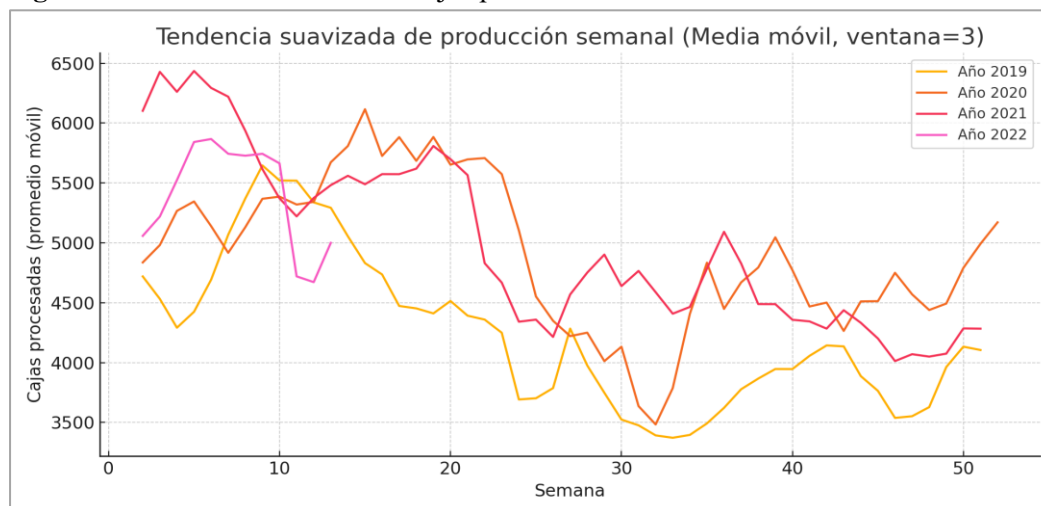
Se implementó un modelo ARIMA (2,1,1) para la serie semanal de cajas procesadas. Este modelo mostró buen ajuste ($RMSE = 82.6$; $AIC = 712.4$), permitiendo simular escenarios productivos con alta confiabilidad. La proyección para el tercer trimestre del año sugiere una probabilidad del 95% de alcanzar 8200 cajas semanales, si se mantienen condiciones climáticas favorables y una adecuada sincronización agronómica, Figura 5.

Figura 5. Matriz de correlaciones entre variables productivas



Adicionalmente, la técnica de suavizado LOESS (Figura 6) evidenció una reducción del ruido intersemanal, permitiendo detectar microciclos productivos. Estos hallazgos son útiles para afinar las decisiones sobre riego, fertilización y cosecha en lapsos de corta duración.

Figura 6. Tendencia suavizada de cajas procesadas



DISCUSIÓN

Adicionalmente, la tendencia suavizada mediante LOESS (Figura 6) mostró una disminución del ruido intersemanal, facilitando la identificación de microciclos de respuesta del cultivo ante intervenciones técnicas. Estas tendencias resultan clave para ajustar la planificación de cosechas y la rotación de insumos, especialmente en escenarios de cambio climático.

Finalmente, la integración de los modelos permitió construir un dashboard de inteligencia productiva, actualmente en fase piloto, que procesa en tiempo real los datos climáticos y agronómicos, generando alertas preventivas para periodos de alto riesgo productivo. Este sistema, alimentado por sensores IoT instalados en 6 puntos de la finca, contribuye a una gestión proactiva del cultivo y representa un paso inicial hacia la agricultura autónoma en el contexto ecuatoriano.

Los hallazgos obtenidos en este estudio validan con alta solidez la utilidad del análisis multianual de series temporales y del enfoque de eficiencia técnica como herramientas complementarias en la modernización de sistemas agropecuarios tropicales. La identificación de patrones estacionales repetitivos y de puntos de inflexión en la productividad semanal sugiere que las decisiones agronómicas

pueden ser significativamente optimizadas mediante modelos predictivos respaldados en evidencia histórica.

La doble estacionalidad identificada en las semanas 2–10 y 30–36 coincide con los ciclos fenológicos del banano descritos en la literatura, donde los periodos de floración y llenado del racimo son altamente sensibles a condiciones térmicas y hídricas (González & Paredes, 2019). Esta coincidencia no solo valida la pertinencia del modelo ARIMA (2,1,1) aplicado, sino que también confirma que la serie semanal de producción puede ser utilizada como proxy robusto para anticipar decisiones sobre fertilización, riego y cosecha.

En concordancia con estudios previos (Hyndman & Athanasopoulos, 2018; Kavinda et al., 2023), los resultados evidencian que los modelos de predicción basados en series temporales permiten reducir la incertidumbre operativa y aumentar la resiliencia ante perturbaciones climáticas. La incorporación del suavizado LOESS añadió valor metodológico al filtrar variaciones espurias y evidenciar tendencias microcíclicas que de otro modo pasarían desapercibidas. Esta capacidad de discernir “señales débiles” es clave en un contexto como el banano orgánico, donde la respuesta agronómica es menos inmediata que en cultivos convencionales.

El enfoque DEA aportó una visión transversal del rendimiento técnico, destacando disparidades entre unidades productivas con insumos homogéneos. Este hallazgo, consistente con la literatura sobre eficiencia en cultivos perennes (Castillo et al., 2024; Haryono, 2024), reafirma que las brechas de productividad no siempre son atribuibles a recursos tangibles, sino a variables de gestión, capacitación y conocimiento técnico. Las unidades ineficientes podrían, mediante benchmarking interno, adoptar mejores prácticas de las unidades eficientes para cerrar las brechas detectadas, lo que representa una vía directa de mejora sin necesidad de incrementar costos operativos.

El comportamiento negativo de la humedad del suelo sobre el rendimiento –con un coeficiente de correlación de $r = -0.61$ – resulta metodológicamente relevante. Este patrón, documentado también por Aparecido et al. (2024) en olivo y por Chukwu et al. (2025) en banano convencional, puede explicarse por la falta de sistemas de drenaje adecuado, lo que provoca condiciones anaeróbicas perjudiciales para el desarrollo radicular. Este hallazgo tiene implicaciones prácticas: la instalación de sistemas de drenaje



pasivo o subsuperficial podría incrementar la eficiencia técnica sin necesidad de modificar la fertilización.

La correlación positiva entre temperatura y cajas procesadas ($r = 0.45$) se alinea con el conocimiento agrofisiológico sobre el cultivo de banano, donde el rango óptimo de temperatura favorece procesos metabólicos como la síntesis de carbohidratos y la elongación celular del racimo. Esto refuerza la pertinencia de incorporar variables climáticas en dashboards inteligentes que puedan advertir a los productores sobre eventos climáticos desfavorables con días de anticipación.

Desde el punto de vista estratégico, la visualización de datos se ha convertido en una herramienta de decisión crítica. La implementación de un prototipo de dashboard productivo con integración IoT representa un paso concreto hacia la agricultura de precisión, permitiendo el monitoreo en tiempo real y la retroalimentación agronómica proactiva. Esto concuerda con lo propuesto por Fernández (2025) y Ritter et al. (2024), quienes destacan que los sistemas de alerta y análisis basados en sensores permiten acortar los tiempos de reacción, reducir mermas y mejorar la trazabilidad del producto final.

Asimismo, se refuerza el argumento de que la transformación digital del agro ecuatoriano no debe limitarse a la adquisición de tecnología, sino a su integración con modelos analíticos validados estadísticamente. La institucionalización de esta cultura de datos puede lograrse mediante alianzas entre fincas, universidades y centros de investigación, configurando ecosistemas de innovación que repliquen estos modelos en otras zonas productoras y con otros cultivos tropicales como cacao, maracuyá o papaya.

Por último, desde un enfoque sistémico, este estudio aporta evidencia empírica sobre cómo el análisis estadístico no solo describe el estado de la producción, sino que transforma su gestión, permitiendo un tránsito desde modelos empíricos hacia sistemas de decisión basados en datos. Esta transición es fundamental en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 2 (Hambre Cero) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), donde la eficiencia y sostenibilidad del agro son pilares estratégicos.



CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio confirman la pertinencia del uso de métodos estadísticos multivariantes y modelos de eficiencia técnica como herramientas claves para optimizar la gestión agropecuaria en cultivos tropicales, particularmente en la producción de banano orgánico.

La identificación de patrones estacionales, correlaciones significativas y diferencias en la eficiencia entre unidades productivas evidencia que la toma de decisiones basada en datos puede generar impactos tangibles en productividad, calidad y sostenibilidad.

En términos técnicos, las series temporales permitieron modelar la dinámica de la producción semanal con alto grado de precisión, facilitando la detección de microciclos y anomalías productivas. El modelo ARIMA seleccionado mostró una capacidad predictiva robusta, con indicadores de ajuste satisfactorios (RMSE, AIC), lo cual refuerza su aplicabilidad como herramienta de planificación agronómica. De igual forma, el análisis de eficiencia técnica mediante DEA reveló oportunidades claras de mejora a nivel parcelario, permitiendo establecer benchmarks internos y estrategias de retroalimentación continua.

Desde la perspectiva de innovación, la incorporación de sensores IoT y tableros inteligentes para el monitoreo en tiempo real representa un avance concreto hacia la agricultura de precisión, permitiendo no solo automatizar la recolección de datos, sino también generar alertas tempranas y recomendaciones agronómicas adaptadas al contexto específico de cada unidad productiva. Esta infraestructura tecnológica resulta fundamental para enfrentar escenarios de variabilidad climática, optimizar insumos y mejorar la rentabilidad del productor.

A nivel estratégico, se recomienda la institucionalización de sistemas de inteligencia agroproductiva que combinen estadística avanzada, IoT y machine learning. Esto implica el fortalecimiento de capacidades locales en ciencia de datos, la creación de alianzas entre actores del agro, centros de investigación y entes gubernamentales, y la generación de una cultura de gestión basada en evidencia. Además, el modelo propuesto puede ser replicado en cultivos tropicales de similares características, como cacao, café y palma, contribuyendo a una agricultura resiliente, tecnificada y sostenible.

Como línea futura de investigación, se propone integrar algoritmos de aprendizaje automático para el perfeccionamiento de modelos predictivos, así como el uso de plataformas interactivas de visualización



(dashboards geospaciales) que permitan al productor interactuar con sus datos en tiempo real y tomar decisiones informadas en función de proyecciones climáticas, análisis de eficiencia y series productivas. En definitiva, este estudio demuestra que la estadística aplicada es un eje transformador en la transición hacia una agroindustria más inteligente, competitiva y orientada al desarrollo sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparecido, L. E. O., Torsoni, G. B., Lima, R. F., Mesquita, D. Z., & Peche, P. M. (2024). Mapeo agroclimático para el cultivo del olivo en Brasil: localización de regiones óptimas de crecimiento. *Revista de ciencia de la alimentación y la agricultura*, 104(6), 3361-3370.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.13221>
- Camargo-Vega, J. J., Camargo-Ortega, J. F., & Joyanes-Aguilar, L. (2015). Conociendo Big Data. *Facultad de Ingeniería*, 24(38), 63–77. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940775006>
- Capa Benítez, L. B., López Fernández, R., & Miguel Benitez, R. (2017). El clúster: una alternativa para la competitividad de las Pymes de banano orgánico en Ecuador. *Revista científica Agroecosistemas*, 5(1), 138–144. <http://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/index>
- Cherubin, M. R., Damian, J. M., Tavares, T. R., Trevisan, R. G., Colaço, A. F., Eitelwein, M. T., Martello, M., Inamasu, R. Y., Pias, O. H. d. C., & Molin, J. P. (2022). Agricultura de precisión en Brasil: La trayectoria de 25 años de investigación científica. *Agriculture*, 12(11), 1882.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12111882>
- Chukwu, S. C., Awala, S. K., Angombe, S., et al. (2025). Avances recientes en técnicas de cultivo de tejidos e innovaciones biotecnológicas para la producción de banano (*Musa spp.*): una revisión. *Discov. Plants*, 2, 13. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00099-2>
- Eyduran, S. P., Akin, M., Eyduran, E., et al. (2020). Pronóstico de la superficie y producción de cosecha de banano en Turquía mediante análisis de series temporales. *Erwerbs-Obstbau*, 62, 281–291.
<https://doi.org/10.1007/s10341-020-00490-1>
- FAO. (2022). *Fertilización adaptativa y sostenibilidad agraria*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fernández, F. (2025). IoT aplicado al monitoreo en tiempo real de cultivos agrícolas. *Reportes Científicos De La FACEN*, 14(1), 62–69. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2023.14.1.62>



- GHM Kavinda, D. D. Dissanayake, K. A. K. K. Nanayakkara, N. H. P. R. S. Swrnakantha, M. N. V. K. Liyanagolla, & P. K. S. Kumari. (2023). Musa Base: aplicación móvil para que los productores de banano minimicen los desafíos en la producción de banano durante el período previo y posterior a la cosecha. *Conferencia internacional de 2023 sobre informática innovadora, comunicación inteligente y sistemas eléctricos inteligentes (ICSES)*, Chennai, India, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICSES60034.2023.10465553>
- Haryono, H. (2024). Crecimiento de la agroindustria bananera en Indonesia. *Estudios Interdisciplinarios de Ciencias Occidentales*, 2(11), 2135–2146. <https://doi.org/10.58812/wsis.v2i11.1445>
- Hongxia Miao, Zhang, J., Zheng, Y., Jia, C., Hu, Y., Wang, J., Zhang, J., Sun, P., Jin, Z., Zhou, Y., Zheng, S., Wang, W., Rouard, M., Xie, J., & Liu, J. (2025). Dar forma al futuro de los plátanos: avanzar en la regulación y el mejoramiento de rasgos genéticos en la era posgenómica. *Horticulture Research*, 12(5). <https://doi.org/10.1093/hr/uhaf044>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice* (2nd ed.). OTexts.
- Ritter, T., Álvarez, D., Mosquera, L. E., Martey, E., & Mockshell, J. (2024). Análisis socioeconómico y costo-beneficio de los métodos de prevención de la Raza Tropical 4 (RT4) entre productores de banano en Colombia. *PLoS ONE*, 19(10), e0311243. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311243>
- Rueda Calderón, M. A., Montenegro-Gracia, E., Araya-Almán, M., & Marys, E. (2022). Prediction of Banana Production Using Epidemiological Parameters of Black Sigatoka: An Application with Random Forest. *Sustainability*, 14, 14123. <https://doi.org/10.3390/su142114123>
- Sánchez Palacios, L. E., Martínez Alcivar, F. R., Torres Sánchez, S. T., Lascano Montes, A. C., & Terán Guajala, G. N. (2024). Agricultura de Precisión en El Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 1532–1542. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9547
- Subrahmanyaswari, T., & Gantait, S. (2022). Biotecnología del banano (*Musa* spp.): progreso multidimensional y perspectivas de un sistema mediado *in vitro*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 106, 3923–3947. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11973-4>



TPWijewardena, K. A. D. C., Kaluarachchi, V. S. V., Vitharana, W. M. S. D., Wijayasundara, U. S. S.

A., & Jayalath, T. (2023). Optimice la producción de banano mediante un sistema de cultivo innovador. *Revista internacional de investigación en ingeniería y gestión*, 13(4), 164–170.

<https://doi.org/10.31033/ijemr.13.4.2>

