



CIENCIA Y TECNOLOGÍA



UTEQ

ISSN:1390 - 4051

e-ISSN:1390 - 4043

Vol. 19, Núm. 2 | Julio 2026

Índice de contenido

Predicción del crecimiento de plantas de <i>Coffea</i> mediante machine learning basado en variables climáticas y agronómicas <i>Prediction of coffee plant growth using machine learning based on climatic and agronomic variables</i>	1
Efecto de <i>Trichoderma harzianum</i> en la supresión de <i>Pratylenchus</i> spp. en el cultivo de banano (<i>Musa paradisiaca</i> L.) variedad Gran William <i>Efecto de Trichoderma harzianum en la supresión de Pratylenchus spp. en el cultivo de banano (Musa paradisiaca L.) variedad Gran William</i>	11
Efecto de <i>Ascophyllum nodosum</i> en el crecimiento y producción del cultivo de zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.) <i>Effect of Ascophyllum nodosum on growth and yield of carrot (Daucus carota L.)</i>	20
Uso de compost e insecticidas botánicos en huertos familiares <i>Use of Compost and Botanical Insecticides in Family Gardens</i>	29
Potencial agronómico y nutricional del maíz criollo en ensilaje para alimentación de rumiantes en el trópico húmedo <i>Agronomic and nutritional potential of creole maize in silage for ruminant feed in the humid tropics</i>	43
Forraje verde hidropónico de maíz (<i>Zea mays</i>) como alimentación de terneros: una revisión actualizada <i>Hydroponic green corn (Zea mays) fodder for feeding calves: an updated review</i>	50
Revisión integral del impacto epidemiológico, productivo y sanitario de <i>Ascaris suum</i> en sistemas de producción porcina <i>Comprehensive review of the epidemiological, production, and health impacts of Ascaris suum in swine production systems</i>	58
Identificación de microplásticos en agua y sedimentos del río Casacay, cantón Pasaje, provincia de El Oro <i>Identification of microplastics in water and sediments of the Casacay river, Pasaje canton, El Oro province</i>	68
Valor económico y ambiental de los servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con café en Latinoamérica <i>Economic and environmental value of ecosystem services in agroforestry systems with coffee in Latin America</i>	77

Predicción del crecimiento de plantas de *Coffea* mediante machine learning basado en variables climáticas y agronómicas

Prediction of *coffee* plant growth using machine learning based on climatic and agronomic variables

Ricardo Augusto Luna Murillo¹, Bryan Alexander Alvarez Real², Joshua Emanuel Vines Manrique², Johnny Xavier Bazaña Zajia²

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador

²Universidad Técnica de Cotopaxi - Extension La Maná, Ecuador

Autor de correspondencia: patoricardo@yahoo.es

Recibido: 10/07/2025. Aceptado: 05/05/2026.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

El cultivo de café en zonas subtropicales enfrenta desafíos crecientes debido a la variabilidad climática y a la necesidad de toma de decisiones agronómicas más precisas, considerando este punto, las técnicas de aprendizaje automático se posicionan como una herramienta crucial para apoyar la gestión agrícola, este estudio expone el desarrollo e integración de un modelo de refuerzo de gradiente para predecir el crecimiento en altura y diámetro del tallo de plantas de café de las variedades Manabí 01 y Sarchimor, utilizando variables climáticas y agronómicas recolectadas mediante sensores instalados en el sector de Sacha Wiwa, La Maná. El modelo con coeficiente de determinación de $R^2=0,554$ para altura y $R^2=0,535$ para diámetro, mostró un desempeño adecuado para predecir el crecimiento de las plantas de café utilizando variables climáticas y agronómicas. Estos resultados, si bien pueden mejorar mediante la optimización del algoritmo y la inclusión de mayores cantidades de datos, evidencian el potencial del machine learning como herramienta para la toma de decisiones agronómicas. Como aplicación práctica, el modelo fue posteriormente integrado en una aplicación móvil para permitir la realización de predicciones en tiempo real y facilitar el monitoreo del desarrollo de las plantas en campo. Aunque se observaron márgenes de error propios de complejidad del entorno agrícola, los resultados mostraron un alto potencial de mejora mediante el uso de conjuntos de datos, más robustos y la optimización del algoritmo, y con ello, esta investigación busca acercar el machine learning al campo, fortaleciendo la toma de decisiones agronómicas basadas en datos concretos.

Palabras clave: café, algoritmo, refuerzo de gradiente, agricultura, aprendizaje supervisado, factores agroclimáticos.

Abstract

Coffee cultivation in subtropical regions faces increasing challenges due to climate variability and the need for more precise agronomic decision-making. Considering this, machine learning techniques are emerging as a crucial tool to support agricultural management. This study presents the development and integration of a gradient boosting model to predict plant growth in terms of height and stem diameter for coffee varieties Manabí 01 and Sarchimor, using climatic and agronomic variables collected through sensors installed in the Sacha Wiwa sector, La Maná. The model, with a coefficient of determination of $R^2 = 0.554$ for height and $R^2 = 0.535$ for diameter, showed adequate performance in predicting coffee plant growth based on climatic and agronomic variables. Although these results can be improved through algorithm optimization and the inclusion of larger datasets, they demonstrate the potential of machine learning as a tool for agronomic decision-making. As a practical application, the model was later integrated into a mobile application to enable real-time predictions and facilitate field monitoring of plant development. Although some margins of error were observed due to the complexity of the agricultural environment, the results showed strong potential for improvement through the use of more robust datasets and algorithm optimization. Ultimately, this research aims to bring machine learning closer to the field, strengthening agronomic decision-making based on concrete data.

Keywords: Coffee cultivation, algorithm, gradient boosting, agriculture, growth prediction, agroclimatic factors.

Introducción

El cultivo de café es un pilar fundamental de la economía agrícola en numerosas regiones subtropicales, en Sacha Wiwa, La Maná, la variación climática y la necesidad de una gestión eficiente de los recursos limitan constantemente la productividad y la calidad de la cosecha de café (Ahmed *et al.*, 2021). En los últimos años, el sector agrícola tiene cada vez más a soluciones innovadoras para abordar estos desafíos, la inteligencia artificial (IA) y machine learning (ML), emergen como herramientas poderosas, al aprovechar datos sobre el clima, las propiedades del suelo y las condiciones de las plantas, estas tecnologías permiten a los productores prever posibles dificultades y optimizar la toma de decisiones.

La ventaja de predecir una temporada seca con semanas de antelación, permite una planificación del riego estratégica, comprender la humedad del aire influye en el desarrollo de las plantas ayudando a identificar los momentos ideales para la poda y la fertilización como lo menciona Astri Muliasari *et al.* (2021), esta mejora no solo aumenta la eficiencia de la producción, sino que también fomentan la sostenibilidad, un factor clave para garantizar que el café de lugares como La Maná, Ecuador, se mantenga en el mercado nacional e internacional.

En regiones cafeteras semejantes al cantón La Maná, la aplicación de machine learning (aprendizaje automático) ha permitido anticipar el ciclo de forestación y estimar rendimientos con varios meses de antelación reduciendo pérdidas asociadas a eventos climáticos extremos, en zonas con limitada conectividad o acceso a servicios técnicos, estos modelos pueden integrarse en aplicaciones móviles o sistemas locales respaldando a pequeños y medianos productores en su labor cotidiana, el machine learning funciona como herramienta tecnológica y mecanismo de democratización del conocimiento y resiliencia productiva (Mena Iza *et al.*, 2024).

Este proyecto surge de la colaboración entre dos actores clave: La Universidad Técnica de Cotopaxi- Extensión La Maná, en representación del sector académico, y FIASA, líder en el sector productivo, juntos comparten la visión de elevar la capacidad productiva y la competitividad internacional del café ecuatoriano, más allá de los resultados inmediatos, esta colaboración refleja un compromiso más amplio con la integración del conocimiento científico con la aplicación práctica, ofreciendo beneficios tangibles a los cafeteros y promoviendo el avance de la agricultura de precisión.

Este proyecto tiene como objetivo dotar a los caficultores de herramientas para planificar y gestionar las etapas de crecimiento de las plantas de café de forma más eficaz, mediante la integración de inteligencia artificial, se busca optimizar la precisión de sus decisiones, impulsando tanto las prácticas agrícolas como la sostenibilidad regional.

Metodología

Sobre esta base, nuestra investigación se centra en la implementación de un sistema predictivo basado en técnicas de ML, diseñado para estimar el crecimiento en altura y el diámetro del tallo de las plantas de café, las variedades de café presentes en el conjunto de datos incluyen Manabí 01 (896 registros) y Sarchimor (768 registros), cultivadas en Sacha Wiwa, La Maná y para lograrlo, nuestro equipo empleó diversos algoritmos, incluyendo stacking regressor, gradient boosting y XGBoost regressor, todo esto se entrenará con una combinación de datos históricos y en tiempo real, capturando factores climáticos como temperatura, precipitación y humedad relativa, atributos del suelo como pH, textura y niveles de nutrientes, prácticas agronómicas como la fertilización y el riego.

El procedimiento de datos se realiza mediante el lenguaje de programación Python, con el apoyo de bibliotecas especializadas: Pandas para la organización y preprocesamiento de datos, y Scikit-learn para la implementación de modelos de aprendizaje automático como lo fue gradient boosting (refuerzo por gradiente), la metodología CRISP-DM guía este esfuerzo y estructura nuestro flujo de trabajo desde la recopilación inicial de datos hasta la validación de modelos predictivos, garantizando rigor y fiabilidad (León Chilito *et al.*, 2025).

La metodología del proyecto se estructuró siguiendo el estándar CRISP-DM, que organiza el ciclo de desarrollo en fases iterativas: entendimiento del problema, comprensión y preparación de los datos, modelado, evaluación y despliegue (Schröer, 2021). Durante el proceso de recolección de datos, se instalaron sensores climáticos y agronómicos en el sector de Sacha Wiwa (La Maná) y se monitoreó el cultivo de café en campo durante el periodo de octubre de 2023 a julio de 2024. Las variables registradas incluyeron temperatura ambiental, precipitación, humedad relativa, pH, textura del suelo, fertilización y frecuencia de riego, así como datos de crecimiento (altura y diámetro del tallo) de las plantas de las variedades estudiadas.

En la fase de entendimiento del problema se definieron claramente los objetivos: predecir el crecimiento de las plantas de café (altura de la planta y diámetro del tallo) a partir de variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad relativa) y agronómicas (pH, textura del suelo, fertilización, riego). Para ello, se instaló un conjunto de sensores meteorológicos y sensores del suelo en el sector de Sacha Wiwa (0°47'45.7"S 79°09'10.6"W con una altitud aproximada es de 500 m sobre el nivel del mar) en La Maná, los cuales permitieron recopilar datos precisos y en tiempo real, sobre las condiciones ambientales y edáficas de la zona de cultivo en base a Waqas *et al.* (2025), de esta manera se logró obtener una base de datos con toda la información necesaria para poder alimentar el modelo de aprendizaje automático. Asimismo, se establecieron los indicadores de desempeño del

modelo: RMSE, MAE y R^2 , que guiarán su evaluación final. Esta fase inicial aseguró que los resultados tuvieran relevancia práctica para los caficultores de Sacha Wiwa (Botero-Valencia *et al.*, 2025).

La investigación se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, apoyándose en el análisis numérico de datos registrados mediante dispositivos especializados en condiciones reales de cultivo. El conjunto de datos utilizado para el entrenamiento y evaluación del modelo está compuesto por 1.664 registros y 28 variables. De estas, 21 son numéricas como temperatura, humedad del aire y del suelo, presión atmosférica, nutrientes y las variables objetivo: altura de planta (AP) y diámetro del tallo (DT), y 7 categóricas —como la variedad de café (Manabí 01, Sarchimor), la edad en días, temperatura ambiental, humedad ambiental, humedad del suelo, presión atmosférica, temperatura suelo, índice de lluvia, pH (potencial de hidrogeno) CE (conductividad eléctrica), MO (materia orgánica), NH_4 (amonio), P (fósforo), S (azufre), K (potasio), Ca (calcio), Mg (magnesio), Cu (cobre), B (boro), Fe (hierro), Zn (zinc), Mn (manganeso), N total (nitrógeno total), arena, limo, arcilla, altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT).

La diversidad y volumen de los datos permitió capturar una representación completa de los factores agronómicos y climáticos que influyen en el desarrollo del cafeto, proporcionando así una base sólida para el aprendizaje y la predicción por parte del modelo.

Recolección y preparación de datos

Los datos se obtuvieron de tres fuentes complementarias extraídas de Sacha Wiwa en el cantón La Maná: (i) una estación meteorológica local que registró variables climáticas horarias (temperatura, precipitación, humedad relativa); (ii) sensores de suelo instalados en parcelas de cafeto, que aportaron mediciones de humedad, porosidad y otros parámetros físicos; y (iii) registros agronómicos de campo que incluyeron características del suelo (pH, textura) y prácticas de manejo (esquema de fertilización y riego). Cada conjunto de datos se exportó en formato estructurado y se documentó su esquema.

En la fase de comprensión de datos se realizó un análisis exploratorio preliminar para verificar rangos plausibles, detectar valores faltantes y estimar correlaciones iniciales entre variables. A continuación, se ejecutó la preparación de datos, aplicando técnicas estándar de limpieza y preprocesamiento, esto incluyó las siguientes tareas principales:

Tratamiento de valores faltantes y atípicos

Se identificaron registros con datos incompletos (como, datos climáticos ausentes) y se imputaron valores cuando fue apropiado (usando la mediana o promedio) o bien se eliminaron registros muy incompletos. También se detectaron valores atípicos fuera de los rangos esperados, los cuales se revisaron con base en el conocimiento agronómico y se corrigieron o eliminaron si correspondían (Omoseebi *et al.*, 2025) (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamiento de valores faltantes y atípicos

Columnas con valores nulos	Imputación aplicada	Registros eliminados	Variables con valores atípicos	Método para detectar outliers
Sin valores nulos	Media/Mediana según el tipo de variable y criterio agronómico	Registros con múltiples nulos o inconsistencia severa	Temperatura_ambiental=256 Temperatura_suelo: 384 Altura_planta: 44 Diametro_tallo: 56	Rango intercuartílico (IQR)

Normalización de características numéricas: Las variables continuas se escalaron mediante normalización (min-max) y estandarización (media 0, varianza 1) para facilitar el entrenamiento de los modelos y evitar que variables de mayor magnitud dominen el ajuste (Prity, 2024).

Codificación de variables categóricas: Las variables cualitativas nominales (como el tipo de café) se transformaron mediante codificación one-hot, creando variables binarias (0/1) para cada categoría mientras se eliminaba una categoría base para evitar multicolinealidad. Para evitar multicolinealidad tras aplicar codificación one-hot, se elimina una categoría base. No obstante, en modelos con regularización Ridge (usado como meta-modelo en el stacking), la multicolinealidad residual es gestionada por la propia penalización del modelo,

lo que aporta robustez y estabilidad a las estimaciones de los coeficientes. Para variables ordinales con jerarquía inherente (como textura del suelo), se aplicó codificación ordinal asignando valores numéricos que preservan el orden de las categorías. Esta transformación permite la incorporación de estas variables en modelos de aprendizaje supervisado manteniendo su significado semántico (Bolikulov *et al.*, 2024). En este estudio, las variables objetivo o etiquetas utilizadas para el entrenamiento y evaluación de los modelos de aprendizaje supervisado fueron “altura de planta (AP)” y “diámetro del tallo (DT)”, ambas registradas como variables continuas que reflejan el crecimiento y desarrollo morfológico del cafeto bajo diferentes condiciones ambientales y agronómicas (Figura 1).

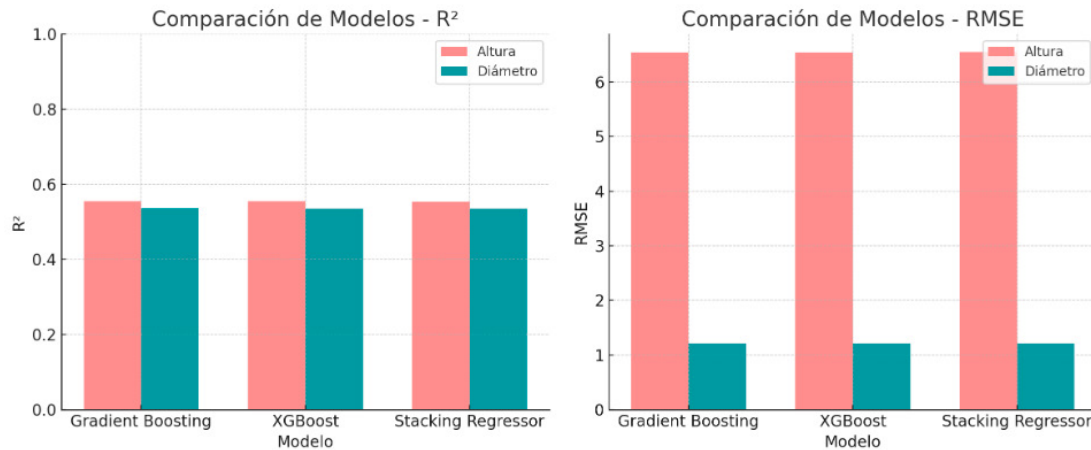


Figura 1. Registro de modelos y su coeficiente de promedio

Tabla 2. Codificación de variable categórica en el conjunto de datos de café

Información	Valor
Variables categóricas	TIPO_DE_CAFE
Distribución por categoría	Manabi 01: 896 Sarchimor: 768
Estrategia de codificación	One-Hot Encoding
Nuevas variables generadas	TIPO_DE_CAFE_Sarchimor

División en conjuntos de entrenamiento y prueba: Finalmente, el conjunto de datos limpio se dividió aleatoriamente en subconjuntos de entrenamiento del 80 % y un subconjunto de prueba del 20 %. Esta partición inicial permitió reservar datos independientes para validar el desempeño final. Además, se configuró la validación cruzada de k - pliegues ($k=5$) sobre el subconjunto de entrenamiento para ajustar hiper parámetros y evaluar la generalización de los modelos (Prity *et al.*, 2024) (Tabla 2).

Evaluación comparativa de modelos de aprendizaje automático

Para predecir las variables objetivo como la altura y el diámetro del tallo de las plantas de café, se implementaron tres enfoques avanzados de aprendizaje automático utilizando el lenguaje de programación Python y scikit-learn, los algoritmos de machine learning, gradient boosting, XGBoost y stacking regressor, fueron elegidos por su capacidad para modelar relaciones complejas y su robustez estadística (Sharma *et al.*, 2023). Cada modelo fue optimizado mediante validación cruzada, utilizando métricas estandarizadas (R^2 , MSE, MAE) para garantizar comparabilidad, este enfoque metodológico permitió evaluar sistemáticamente el rendimiento predictivo de cada técnica antes de mostrar la selección final.

La selección de los hiperparámetros del modelo se realizó considerando el tamaño y la variabilidad del conjunto de datos, así como la necesidad de evitar tanto el sobreajuste

como el subajuste. Un número de 200 árboles ($n_{estimators}$) proporciona suficiente capacidad de aprendizaje sin incurrir en excesivo tiempo de cómputo, mientras que una tasa de aprendizaje de 0,1 permite un ajuste gradual de los árboles que favorece la generalización del modelo. La profundidad máxima de 3 niveles ($max_depth=3$) fue elegida para limitar la complejidad de cada árbol, controlando el riesgo de sobreajuste en base de datos de tamaño moderado. Para XGBoost, se exploraron valores de max_depth entre 4 y 8 y tasas de aprendizaje entre 0,01 y 0,1 usando grid search, buscando el mejor equilibrio entre bajo error y estabilidad del modelo. Otros hiperparámetros como $gamma$ y $colsample_bytree$ se optimizaron para mejorar la robustez y la generalización, ajustando la selección de características y la regularización durante el entrenamiento.

El modelo stacking regressor (apilamiento de regresores) combinó los modelos GBR y XGB junto con lightGBM como estimadores base, utilizando ridge regression (regresión de crestas) como meta-modelo, esta estrategia de ensamblado jerárquico demostró superioridad al integrar las fortalezas predictivas de cada algoritmo individual, cada componente del modelo stacking fue previamente ajustado mediante validación cruzada, asegurando coherencia en la pipeline, es importante destacar que modelos lineales ya árboles de decisión individuales fueron descartados en fases preliminares por su menor capacidad predictiva en este contexto específico (Sharma *et al.*, 2023).

Validación y selección del modelo de aprendizaje

El proceso de validación del modelo gradient boosting seleccionado se desarrolló mediante una metodología estructurada, que garantizó la robustez y confiabilidad de los resultados. Para ello, se implementó una estrategia de validación cruzada con cinco particiones estratificadas, asegurando que cada subconjunto mantuviera la distribución representativa de las variables objetivo.

Para cada partición, se calcularon sistemáticamente tres métricas clave: el error cuadrático medio raíz (RMSE), el error absoluto medio y el coeficiente de determinación (R^2), estas métricas permitieron evaluar exhaustivamente diferentes aspectos del desempeño predictivo, desde la magnitud del error hasta la capacidad explicativa del modelo, estudios recientes de Mustapha *et al.*, (2025) y Huber *et al.*, (2022) destacan la importancia de estas tres métricas para la evaluación de modelos Boosting en dominios ingenieriles y agrícolas, reportando valores de R^2 superiores a 0,99 y RMSE/MAE significativamente bajos.

Como etapa final de proceso de validación, se reservó un conjunto de prueba independiente, correspondiente al 20% de los datos originales, para realizar una evaluación externa del modelo gradient boosting, este paso fue fundamental para verificar que el desempeño predictivo se mantuviera consistente con datos no vistos durante el proceso de entrenamiento y ajuste. La implementación de esta validación externa siguió los mismos protocolos estadísticos aplicados en la fase de validación cruzada, asegurando la comparabilidad directa de los resultados, estrategia recomendada en estudios agronómicos recientes.

Resultados

La fase de evaluación y análisis se centró en determinar la capacidad predictiva del modelo gradient boosting. El modelo mostró un desempeño satisfactorio para estimar el crecimiento en altura y diámetro del tallo de las plantas de café, presentando un error cuadrático medio (RMSE) de 1,21 mm y un sesgo promedio de 0,59, lo que indica una ligera tendencia a la sobreestimación. Estos errores se consideran aceptables para variables morfológicas en condiciones de campo, y evidencian la utilidad del modelo para describir el desarrollo morfológico de las variedades Manabí 01 y Sarchimor bajo diferentes condiciones climáticas y agronómicas.

El modelo gradient boosting, tras ser entrenado y validado, presentó una capacidad predictiva aceptable para estimar el crecimiento en altura y diámetro del tallo de las plantas de café de las variedades Manabí 01 y Sarchimor. Los resultados evidenciaron que la arquitectura del modelo logró captar relaciones relevantes entre las variables climáticas y agronómicas medidas en campo, permitiendo predecir el desarrollo morfológico con un margen de error bajo dentro del contexto agrícola estudiado (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación del rendimiento de los tres modelos seleccionados

Modelo	R^2	R^2	RMSE	RMSE	MAE	MAE
Gradient Boosting	0,554	0,535	6,543	1,212	4,792	0,928
XG Boost	0,555	0,535	6,545	1,212	4,798	0,928
Stacking Regressor	0,553	0,534	6,553	1,213	4,807	0,929

Altura de la planta

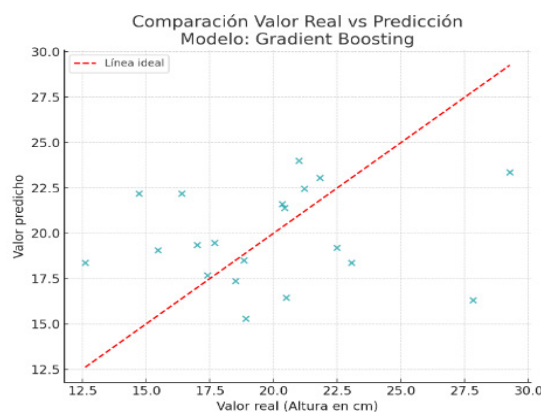


Figura 2. Comparación de los valores reales y los valores de predicción de la altura

Aunque inicialmente se afirmó un “alineamiento estrecho” entre las predicciones y los datos observados en campo, los resultados reales indican una correlación moderada, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,554$, valor que está significativamente por debajo del umbral ideal ($>0,8$).

El error cuadrático medio (RMSE) fue de 6,54 cm, lo que representa una desviación notable respecto a los valores

reales. Además, se detectó un sesgo promedio de 0,1 cm, lo que sugiere una tendencia a la sobreestimación.

El gráfico de comparación “Valor Real vs Predicción” muestra una dispersión considerable alrededor de la línea ideal, con errores sistemáticos que afectan especialmente ciertos rangos de altura, lo que limita la generalización del modelo en escenarios más amplios (Figura 2).

Diámetro del tallo

La evaluación del modelo gradient boosting aplicado a la variable diámetro del tallo refleja un resultado consistente, con un coeficiente de terminación de $R^2 = 0,535$, lo que indica que el modelo logra explicar una proporción significativa de la variabilidad presente en los registros de datos. El error cuadrático medio (RMSE) obtenido fue de 1,21 mm, valor aceptable considerando las dimensiones de esta variable morfológica. Además, se registró un sesgo promedio de 0,59, lo que indica una ligera tendencia a la sobreestimación en las predicciones generadas.

Como se observa en la Figura 3, la dispersión entre los valores reales y predichos muestra que el modelo logra capturar adecuadamente las tendencias generales del crecimiento del tallo, con una alineación visible en entorno a la línea ideal de referencia, a pesar de la presencia de dispersión en algunos

puntos, el ajuste global permite representar con precisión los patrones estructurales de la variable.

La suma de todos estos resultados, respaldan la utilidad del modelo en tareas de predicción morfológica, contribuyendo a una comprensión más precisa del desarrollo estructural del cultivo bajo análisis.

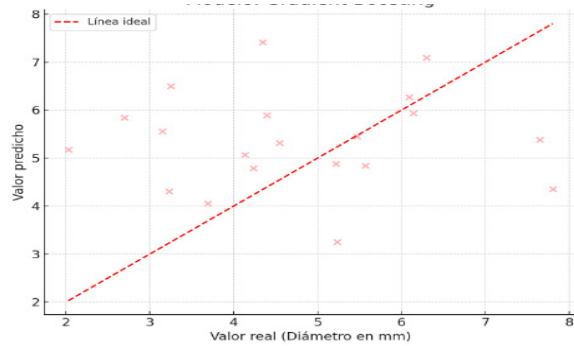


Figura 3. Comparación de los valores reales y los valores de predicción del diámetro

Análisis de métricas de desempeño del modelo gradient boosting

Para evaluar objetivamente el rendimiento predictivo del modelo, se calcularon métricas estadísticas clave como el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y

el coeficiente de determinación (R^2), todos estos indicadores permitieron analizar con mayor profundidad la calidad de las predicciones generadas para las variables morfológicas de interés.

Métricas generales

La Tabla 4 representa las métricas de desempeño del modelo gradient boosting para las variables, altura de la planta y diámetro del tallo, obtenidas mediante validación cruzada y evaluación en conjunto de prueba independientes del 20 % de los datos, los resultados obtenidos reflejan la capacidad predictiva del modelo con los hiperparámetros configurados los cuales son, $n_estimators=200$, $learning_rate=0,1$ y $max_depth=3$.

Estos resultados indican que el modelo explica el 55,4 % de la varianza en la altura de la planta y el 53,5 % en el diámetro del tallo, con errores absolutos promedio de 4,79 cm y un 0,93 mm, respectivamente, mientras que el error relativo se mantiene por debajo del 11 %, lo que demuestra un buen ajuste a las escalas de las variables objetivo, por otra parte, el sesgo promedio, calculado como la media de los residuales, muestra una ligera subestimación en ambas predicciones.

Tabla 4. Métricas principales del modelo de aprendizaje automático

Variable	RMSE	MAE	R^2	Error Relativo (%)	Sesgo Promedio
Altura de planta	6,543	4,792	0,554	10,8	-0,42
Diámetro de tallo	1,212	0,928	0,535	9,6	-0,35

Tabla 5. Estadísticas detalladas de errores del modelo de aprendizaje automático

Variable	Rango Error (%)	Q1 Error (%)	Mediana Error (%)	Q3 Error (%)	Errores > 10 %	Errores > 20 %
Altura de planta	[-48,3, 95,2]	-9,5	-0,8	8,3	52,1	21,4
Diámetro de tallo	[-49,1, 47,5]	-12,5	-5,1	3,9	55,3	20,8

Distribución de errores

El análisis detallado de la distribución de errores porcentuales permite evaluar la consistencia y confiabilidad del modelo gradient boosting en sus predicciones, como se observa en la Tabla 5 la cual detalla valores estadísticos clave que caracterizan el comportamiento de los errores para ambas variables objetivo, proporcionando insights valiosos sobre el desempeño predictivo en diferentes rangos de valores.

Los resultados muestran patrones importantes en la distribución de errores, para la altura de la planta el 50 % central de las predicciones presenta errores entre -9,5 % y 8,3 %, con una mediana cercana a cero, lo que indica una distribución equilibrada de sobreestimaciones y subestimaciones, mientras que el caso del diámetro del tallo, se observa una ligera tendencia a subestimar los valores mediana de -5,1 %,

aunque el rango intercuartílico, Q1 y Q3 se mantiene dentro de límites aceptables. Es notable que aproximadamente el 45 % de las predicciones para las dos variables tratadas presentan errores absolutos menores al 10 %, demostrando una precisión considerable en una proporción significativa de los casos, sin embargo, la presencia de valores atípicos sugiere que ciertas condiciones específicas en los datos pueden representar un desafío para el modelo actual.

Validación del modelo en condiciones de campo

Tras la fase de desarrollo y evaluación cuantitativa del modelo gradient boosting, se implementó la aplicación móvil para la comunidad Sacha Wiwa, donde los caficultores ingresaron datos en tiempo real sobre clima, el suelo, tipo de café y el estado de las plantas directamente desde sus parcelas, la suma

de todo este procedimiento permitió evaluar la robustez del sistema en un entorno productivo, con conectividad variable y condiciones agroclimáticas heterogéneas.

Durante la validación en campo, el modelo demostró su capacidad para estimar de manera automática la altura y el diámetro del tallo de las plantas, mostrando un comportamiento estable y resultados consistentes al compararse con las mediciones reales. Esta funcionalidad permitió a los usuarios identificar de forma rápida las tendencias de crecimiento de los cultivos, sin necesidad de realizar cálculos manuales adicionales, lo que optimiza el tiempo y reduce posibles errores humanos. Estudios previos respaldan estos resultados, señalando que los modelos de aprendizaje automático pueden alcanzar niveles adecuados de precisión en contextos reales, siempre que se apliquen protocolos claros y estandarizados para la recolección de datos en campo (Muñoz Ordoñez *et al.*, 2023).

Además de los resultados cuantitativos, se recopilaron observaciones cualitativas que complementaron el análisis objetivo del desempeño del modelo. En este sentido, se identificó que las mayores discrepancias entre los valores estimados y los observados se produjeron principalmente durante episodios de cambios abruptos en la precipitación o en áreas con alta heterogeneidad del suelo. Este comportamiento es coherente con lo reportado en investigaciones previas, donde la variabilidad climática ha sido señalada como un factor que influye en el rendimiento predictivo de modelos aplicados a distintos cultivos (Ruiz-Del-Angel *et al.*, 2019). No obstante, estas desviaciones puntuales no afectaron la valoración general del sistema por parte de los productores, quienes destacaron su utilidad para comparar parcelas y apoyar la planificación del manejo agrícola.

Finalmente, el análisis de los errores en relación con las variables ambientales reveló patrones consistentes que abren oportunidades de mejora para el modelo. En particular, futuras investigaciones podrían incorporar índices avanzados de humedad del suelo o información proveniente de sensores remotos de temperatura, con el fin de aumentar la precisión de las estimaciones. En conjunto, los resultados de la validación en condiciones reales evidencian que el modelo constituye una herramienta práctica, accesible y de alto valor para el monitoreo morfológico del cultivo de café, contribuyendo a acercar las aplicaciones de inteligencia artificial al productor y a fortalecer los procesos de toma de decisiones agrícolas.

Impacto en la gestión agronómica

La implementación de un modelo predictivo basado en el algoritmo de refuerzo de gradiente (gradient boost), integrado a través de una aplicación móvil, permitió a los usuarios introducir datos climáticos y agronómicos locales, generando estimaciones automáticas del crecimiento de plantas de café. Esta herramienta fue utilizada por estudiantes, docentes y agricultores del sector de Sacha Wiwa, con el objetivo de evaluar su utilidad en contextos educativos y productivos.

Consideraciones sobre el desempeño predictivo y su aplicabilidad

A pesar de las limitaciones cuantitativas previamente identificadas, el modelo predictivo evidenció un potencial funcional para contextos agrícolas reales, más allá de los indicadores estadísticos, la herramienta demostró ser operativa en campo, facilitando una interacción fluida con los usuarios, aspecto, el cual resulta crucial en entornos agrícolas, donde la facilidad de uso y la utilidad práctica inmediata ayudan en gran medida a la incorporación de herramientas tecnológicas en el campo.

Algunos factores que podrían haber influido en los resultados observados incluyen características del conjunto de datos utilizados para el entrenamiento del modelo refuerzo de gradiente, así como también la presencia de registros duplicados y con baja variabilidad, la escasa diversidad real entre las observaciones, el tamaño reducido de la muestra, la ausencia de variables clave relacionadas con el fenómeno estudiado, todos estos elementos pueden haber restringido la capacidad del modelo para captar relaciones complejas.

La percepción de utilidad expresada por los beneficiarios coincide con hallazgos en la literatura reciente que señalan la importancia de soluciones híbridas que combinan precisión técnica con accesibilidad práctica. En este sentido, el modelo logró ser comprendido y utilizado tanto por actores técnicos como por agricultores, lo cual valida su diseño centrado en el usuario (Hernández-Salazar *et al.*, 2024).

Por otro lado, el análisis de errores sugiere que variables ambientales como la precipitación podrían estar introduciendo variabilidad significativa en las predicciones. Esto plantea la necesidad de incorporar un mayor volumen de datos y refinar la arquitectura del modelo, particularmente mediante la inclusión de series temporales y factores de manejo agronómico más detallados (Castro y Durán, 2023).

Discusión

La validación del modelo de gradient boosting en condiciones reales de campo evidenció que el sistema es capaz de estimar de forma automática la altura de la planta y el diámetro del tallo del café con un comportamiento estable frente a las mediciones directas realizadas por técnicos en parcelas productivas. Esta estabilidad operacional resulta especialmente relevante en contextos agrícolas reales, donde la variabilidad ambiental, la heterogeneidad del suelo y las diferencias en las prácticas de manejo suelen introducir ruido significativo en los datos. La capacidad del modelo para reproducir tendencias generales de crecimiento, aun con márgenes de error moderados, confirma su utilidad como herramienta de apoyo al monitoreo morfológico y no únicamente como un ejercicio académico de predicción.

Desde una perspectiva comparativa, la selección del modelo final se fundamentó en un análisis multidimensional de desempeño, en el que se contrastaron métricas de error

(RMSE, MAE) y capacidad explicativa (R^2) entre gradient boosting, XGBoost y stacking regressor. Si bien los tres modelos mostraron resultados similares, el gradient boosting evidenció un equilibrio más consistente entre precisión predictiva y capacidad de generalización, con variaciones mínimas de error entre las distintas particiones de validación cruzada. Este comportamiento coincide con lo reportado por Mustapha *et al.* (2025), quienes señalan que diferencias porcentuales inferiores al 1 % entre los conjuntos de entrenamiento y validación constituyen un indicador robusto de resistencia al sobreajuste, especialmente en problemas con datasets de tamaño moderado y alta multicolinealidad, como es el caso de los sistemas agroclimáticos.

No obstante, los valores obtenidos de R^2 (0,554 para altura de planta y 0,535 para diámetro del tallo) reflejan una correlación moderada entre las predicciones y los valores observados. Estos resultados, si bien se sitúan por debajo de umbrales ideales ($>0,8$), deben interpretarse a la luz de la complejidad inherente al entorno agrícola. En cultivos perennes como el café, el crecimiento morfológico está influenciado por interacciones no lineales entre factores climáticos, edáficos, fisiológicos y de manejo, muchos de los cuales no siempre pueden ser capturados completamente mediante sensores o registros agronómicos estándar. En este sentido, los errores observados no invalidan el modelo, sino que delimitan su alcance y subrayan la necesidad de enfoques progresivos de mejora.

El análisis detallado de los errores permitió identificar patrones consistentes asociados a variables ambientales específicas. En particular, se observó que las mayores desviaciones entre valores predichos y reales se concentraron en periodos con cambios abruptos de precipitación y en parcelas con alta heterogeneidad del suelo. Este comportamiento concuerda con estudios previos que documentan cómo la variabilidad climática extrema introduce inestabilidad en los modelos predictivos agrícolas, incluso cuando se emplean algoritmos avanzados de machine learning. La dispersión observada en los gráficos de “valor real vs. predicción” sugiere que el modelo captura adecuadamente las tendencias globales, pero presenta limitaciones para representar eventos extremos o condiciones locales altamente específicas.

Desde el punto de vista de la aplicabilidad, un hallazgo relevante del estudio es que, pese a las limitaciones cuantitativas, la percepción de utilidad por parte de los usuarios finales fue positiva. Los caficultores, estudiantes y técnicos que interactuaron con la aplicación móvil destacaron su valor para comparar parcelas, identificar tendencias de crecimiento y apoyar la planificación del manejo agronómico. Este resultado refuerza la idea de que, en contextos productivos, la adopción tecnológica no depende exclusivamente de la precisión estadística, sino también de la accesibilidad, facilidad de uso y capacidad de traducir datos complejos en información accionable.

En este marco, la integración del modelo en una aplicación móvil constituye uno de los principales aportes del estudio. Al permitir la introducción de datos locales y la obtención de predicciones en tiempo real, el sistema materializa el enfoque CRISP-DM hasta su fase de despliegue, cerrando la brecha entre el desarrollo algorítmico y la toma de decisiones en campo. Esta implementación valida el potencial del machine learning como herramienta de democratización del conocimiento agronómico, particularmente en zonas con acceso limitado a asistencia técnica especializada.

Finalmente, los resultados de la discusión sugieren líneas claras de trabajo futuro. La incorporación de índices avanzados de humedad del suelo, variables derivadas de series temporales y datos provenientes de sensores remotos de temperatura podría mejorar la sensibilidad del modelo frente a condiciones ambientales dinámicas. Asimismo, el uso de conjuntos de datos más robustos y diversos, junto con técnicas de modelado híbrido que integren enfoques estadísticos y fisiológicos, permitiría reducir los márgenes de error y aumentar la capacidad explicativa del sistema.

En conjunto, la validación en condiciones reales confirma que el modelo no debe entenderse como una solución definitiva, sino como un sistema en evolución. Su valor radica en complementar el conocimiento empírico del agricultor con estimaciones basadas en datos, fortaleciendo la toma de decisiones informadas en un contexto de creciente incertidumbre climática y productiva.

Conclusión

La incorporación de herramientas tecnológicas innovadoras como los modelos de aprendizaje automático (machine learning) en el ámbito del cultivo de plantas de café, no es algo que se aleje de la realidad, sino una posibilidad que ya empieza a transformar la manera en la que los agricultores interpretan y gestionan los procesos de sus cultivos. En esta investigación, la implementación de un modelo refuerzo de gradientes (gradient boosting), demostró su potencial para que poder predecir el crecimiento tanto de altura como del diámetro del tallo de una planta de café, aunque con pequeños márgenes de error que incitan a seguir investigando y mejorando el modelo de aprendizaje automático, los resultados obtenidos del modelo fueron prometedores, explicando el 55,4 % de la varianza en la altura de la planta y el 53,5 % en el diámetro del tallo, con errores relativos inferiores al 11 %, lo que respalda su aplicabilidad práctica en el campo agrícola.

Finalmente, en la fase de despliegue se integró el modelo predictivo seleccionado en una aplicación móvil desarrollada en React Native, siguiendo el enfoque de CRISP-DM, se procedió al despliegue operativo del modelo entrenado.

Este enfoque resulta especialmente útil en proyectos interdisciplinarios donde confluyen agrónomos, informáticos, meteorólogos y tomadores de decisiones (Bassine *et al.*, 2023). Para ello, el modelo se exportó a un formato compatible con dispositivos móviles, como lo es un archivo pkl, y se encapsuló en la aplicación. La interfaz permite al usuario ingresar los valores locales de temperatura, humedad, pH, etc. y obtener en tiempo real las predicciones de altura y diámetro. De este modo, el sistema integra de forma operativa el componente de machine learning con herramientas de uso cotidiano, cerrando el ciclo CRISP-DM desde la comprensión del negocio hasta la puesta en servicio del modelo para la toma de decisiones agronómicas.

Los resultados obtenidos permiten evaluar con mayor precisión el desempeño del modelo en la predicción de dos variables morfológicas clave: la altura de la planta y el diámetro del tallo. Si bien se observaron ciertas tendencias de ajuste, los indicadores cuantitativos revelan limitaciones importantes en la capacidad predictiva del modelo.

El valor de este proyecto reside en su aplicación práctica, el hecho de poner una herramienta predictiva en manos de los caficultores de Sacha Wiwa representa un paso hacia una agricultura más informada, sensible al entorno y basada en datos, aunque los resultados mostraron cierto margen de error, sí son suficientemente alentadores para considerar este proyecto como base de futuras optimizaciones. Trabajar con una base de datos (dataset) mucho más robusta, refinar los algoritmos y entender mejor la interacción entre las variables climáticas y agronómicas, permitirá mejorar la precisión y reducir los márgenes de error del sistema.

En definitiva, este proyecto es un primer paso hacia una forma distinta de cultivar: una en la que el conocimiento del campo se complementa con la inteligencia artificial. No se trata de reemplazar la experiencia del agricultor, sino de fortalecerla con herramientas que le ayuden a tomar decisiones más oportunas y eficaces en un contexto climático cada vez más incierto.

Finalmente, el modelo debe entenderse como un sistema en evolución. Su propósito no es reemplazar el conocimiento empírico del agricultor, sino complementarlo mediante una herramienta de apoyo basada en datos. La interacción entre experiencia humana y aprendizaje automático se proyecta como un eje fundamental para la agricultura del futuro, particularmente en zonas vulnerables al cambio climático, donde cada decisión basada en evidencia puede representar la diferencia entre estabilidad y pérdida de productividad (Carvajal Chávez, 2024).

Agradecimientos

Se deja constancia del agradecimiento a la Red Universitaria de Investigación y Desarrollo Cafetalero (REDUCAFÉ), a la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná - Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas con el

proyecto “Fomento a la producción integral del cultivo de café en la provincia de Cotopaxi”, al Fondo de Investigación para la Agrobiodiversidad, Semillas y Agricultura Sustentable (FIASA) con el proyecto “Sistemas agro-productivos de fabáceas en asociación con cacao y café en un contexto de economía circular para el desarrollo sostenible.

Referencias

- Ahmed, S., Brinkley, S., Smith, E., Sela, A., Theisen, M., Thibodeau, C., Warne, T., Anderson, E., Van Dusen, N., Giuliano, P., Ionescu, K. E., and Cash, S. B. (2021). Climate change and coffee quality: Systematic review on the effects of environmental and management variation on secondary metabolites and sensory attributes of *coffea arabica* and *coffea canephora*. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.708013>
- Astri Muliasari, A., Kemala Dewi, R., Fatchur Rochmah, H., Rakoto Malala, A., y Gamawati Adinurani, P. (2021). Improvement generative growth of *Coffea arabica* L. Using plant growth regulators and pruning. *E3S Web of Conferences*, 226, 00003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122600003>
- Bassine, F. Z., Epule, E. T., Kechchour, A., y Chehbouni, A. (2023). Recent applications of machine learning, remote sensing, and iot approaches in yield prediction: a critical review. <https://arxiv.org/abs/2306.04566>
- Bolikulov, F., Nasimov, R., Rashidov, A., Akhmedov, F., y Cho, Y.-I. (2024). Effective methods of categorical data encoding for artificial intelligence algorithms. *Mathematics*, 12(16), 2553. <https://doi.org/10.3390/math12162553>
- Botero-Valencia, J., García-Pineda, V., Valencia-Arias, A., Valencia, J., Reyes-Vera, E., Mejia-Herrera, M., y Hernández-García, R. (2025). Machine learning in sustainable agriculture: Systematic review and research perspectives. *Agriculture*, 15(4), 377. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040377>
- Carvajal Chávez, C. A. (2024). Uso de técnicas como la regresión y redes neuronales para anticipar el rendimiento del maíz. *RECIMUNDO*, 8(4), 126–135. [https://doi.org/10.26820/recimundo/8.\(4\).diciembre.2024.126-135](https://doi.org/10.26820/recimundo/8.(4).diciembre.2024.126-135)
- Castro Hernández, D. O., y Durán Blanco, E. C. (2023). *Modelo predictivo para el rendimiento de cultivos de cacao y café en el departamento de Santander basado en herramientas de aprendizaje automático profundo y variables climáticas*. [Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12278>
- Hernández-Salazar, C. A., González-Estrada, O. A., y González-Silva, G. (2024). Integración de la inteligencia artificial y la agricultura de precisión en cultivos de café. *Revista UIS Ingenierías*, 23(4). <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n4-2024012>

- Huber, F., Yushchenko, A., Stratmann, B., Steinhage, V. (2022). Extreme gradient boosting for yield estimation compared with deep learning approaches. *Computers and electronics in agriculture*, 202, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107346>
- León Chilito, E. D., Casanova Olaya, J. F., Corrales, J. C., Figueroa, C. (2025). Sustainability-driven fertilizer recommender system for coffee crops using case-based reasoning approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1445795>
- Mena Iza D. V., Quiroga Yanez V. F., Borja Borja C. D., Bajana Zajia J. X. (2024). Impact of climatic factors on coffee. *Nanotechnology Perception*, 20(7), 1912-1921. <https://nano-ntp.com/index.php/nano/article/view/4351>
- Muñoz Ordoñez, C. C., Cobos Lozada, C. A., y Muñoz Ordóñez, J. F. (2023). Predicción del rendimiento de cultivos de café: un mapeo sistemático. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.13171>
- Mustapha, I.B., Abdulkareem, M., Hasan, S., Ganiyu, A.A., Nabus, H., y Lee, J.C. (2025). Intelligent gradient boosting algorithms for estimating strength of modified subgrade soil. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.04826>
- Omoosebi, A., Ola, G., Tyler, J. (2025). Data preparation and feature engineering. https://www.researchgate.net/publication/389860294_Data_Preparation_and_Feature_Engineering
- Prity, F. S., Hasan, MD. M., Saif, S. H., Hossain, Md. M., Bhuiyan, S. H., Islam, Md. A., y Lavlu, M. T. H. (2024). Enhancing agricultural productivity: A machine learning approach to crop recommendations. *Human-Centric Intelligent Systems*, 4(4), 497–510. <https://doi.org/10.1007/s44230-024-00081-3>
- Ruiz-Del-Angel, E. O., Vargas Castilleja, R. D. C., Rolón Aguilar, J. C., y Chávez García, C. A. (2019). Modelo de requerimiento hídrico en un distrito de riego en México: incorporando escenarios de cambio climático. *Biotechnia*, 21(2), 129–136. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v21i2.946>
- Schröer, C. (2021). Towards microservice identification approaches for architecting data science workflows. *Procedia Computer Science*, 181, 519–525. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.198>
- Sharma, P., Dadheech, P., Aneja, N., y Aneja, S. (2023). Predicting agriculture yields based on machine learning using regression and deep learning. *IEEE Access*, 11, 111255–111264. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321861>
- Waqas, M., Naseem, A., Humphries, U. W., Hlaing, P. T., Dechpichai, P., y Wangwongchai, A. (2025). Applications of machine learning and deep learning in agriculture: A comprehensive review. *Green Technologies and Sustainability*, 3(3), 100199. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100199>



Efecto de *Trichoderma harzianum* en la supresión de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.) variedad Gran William

Efecto de *Trichoderma harzianum* en la supresión de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.) variedad Gran William

Mauro Danilo Palacios Moran , Juan Bautista Troncozo Correa , Víctor Jorge García Gallirgos , Willington Paul Alcívar Macías

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador

Autor de correspondencia: juan.troncozo2017@uteq.edu.ec

Recibido: 16/10/2025. Aceptado: 10/06/2026.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

Los nematodos constituyen uno de los principales agentes fitoparásitos responsables de las mayores pérdidas en las plantaciones de musáceas. El género *Trichoderma* se ha propuesto como una alternativa biológica para el control de organismos patógenos. La presente investigación se desarrolló en las instalaciones del Campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, con el objetivo de evaluar el efecto de *Trichoderma harzianum* sobre la población de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano variedad Gran William. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con seis tratamientos y tres repeticiones: T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}), T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}), T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}), T5 (control químico con nematicida) y T6 (control sin aplicación). Los resultados demostraron que los tratamientos con *T. harzianum* en las mayores concentraciones (T3 y T4), así como el control químico (T5), fueron efectivos en la disminución de la tasa neta reproductiva. Además, se observó un efecto significativo sobre variables morfológicas, longitud y el peso total de las raíces. El tratamiento químico (T5) presentó la mayor eficacia en la reducción de raíces no funcionales y en la disminución de *Pratylenchus* spp., seguido del tratamiento con *T. harzianum* a la concentración 1×10^{10} conidios mL^{-1} (T4). Se evidenció el potencial de *T. harzianum* como una alternativa biológica eficaz al uso de nematicidas químicos, contribuyendo a un manejo de los nematodos en el cultivo de banano.

Palabras clave: nematodos, conidia, biological control, mycoparasite.

Abstract

Nematodes are one of the main plant parasitic agents responsible for the greatest losses in banana plantations. The *Trichoderma* genus has been proposed as a biological alternative for controlling pathogenic organisms. This research was conducted at the “La María” Campus of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo. The objective was to evaluate the effect of *Trichoderma harzianum* on the *Pratylenchus* spp. population in banana Gran William variety. A completely randomized design (CRD) was used with six treatments and three replications: T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidia mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidia mL^{-1}), T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidia mL^{-1}), T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidia mL^{-1}), T5 (chemical control with nematicide) and T6 (control without application). The results demonstrated that treatments with *T. harzianum* at the highest concentrations (T3 and T4), as well as chemical control (T5), were effective in reducing nematode decreasing the net reproductive rate. In addition, a significant effect was observed on morphological variables root length and total weight. Chemical treatment (T5) was most effective in reducing nonfunctional roots and decreasing *Pratylenchus* spp., followed by treatment with *T. harzianum* at a concentration of 1×10^{10} conidia mL^{-1} (T4). This demonstrated the potential of *T. harzianum* as an effective biological alternative to chemical nematicides, contributing to nematode management in banana crops.

Keywords: nematodes, conidia, biological control, mycoparasite.

Introducción

El banano (*Musa paradisiaca* L.) constituye uno de los cultivos tropicales de mayor relevancia económica y social a nivel mundial, al ser una fuente fundamental de alimento, empleo e ingresos para millones de personas (Beteta Alvarado *et al.*, 2022). La producción mundial de banano supera los 120 millones de toneladas anuales, siendo cultivado en más de 130 países de las regiones tropicales y subtropicales (Subash y Perumalsamy, 2024).

En Ecuador, el cultivo de banano representa un pilar esencial de la economía nacional y del desarrollo agrícola (Soto-Valenzuela *et al.*, 2024). La producción nacional supera los 7 millones de toneladas anuales, generando empleo directo e indirecto a más de 2 millones de personas (Piedra-Bonilla y Echeverría, 2024).

No obstante, la sostenibilidad de este cultivo enfrenta serias amenazas fitosanitarias, entre ellas la infestación por nematodos fitoparásitos (Cuzco Jiménez *et al.*, 2021). Dentro de las especies más dañinas que afectan al cultivo se encuentra *Pratylenchus*, un nematodo migratorio endoparásito ampliamente distribuido en los sistemas bananeros tropicales (Nomura *et al.*, 2024). Este patógeno penetra las raíces, donde se alimenta del contenido celular y provoca lesiones necróticas que coalescen y limitan el flujo de savia (Castillo Castillo *et al.*, 2025). *Pratylenchus* se caracteriza por su rápida reproducción, su adaptabilidad a diversos tipos de suelo y su capacidad de sobrevivir en residuos vegetales (Castillo-Arévalo, 2022b).

Tradicionalmente, el control de nematodos en banano se ha basado en la aplicación de nematicidas químicos como el fenamifos, oxamil o carbofurano, los cuales, si bien ofrecen un efecto rápido, presentan serias limitaciones en términos ambientales y de salud humana (Sandoval-Ruiz *et al.*, 2022). Estos productos pueden generar contaminación del suelo, lixiviación hacia fuentes hídricas y acumulación de residuos tóxicos, afectando la biodiversidad del agroecosistema (Arboleda-Riascos *et al.*, 2022).

En este contexto, el género *Trichoderma* ha cobrado gran importancia como alternativa biológica en la protección de cultivos frente a diversos patógenos del suelo, incluidos los nematodos (López Martínez *et al.*, 2022). *Trichoderma* spp. son hongos filamentosos de vida libre, ampliamente distribuidos en suelos agrícolas y rizosferas, reconocidos por su capacidad antagonista, promotora del crecimiento vegetal y de biocontrol (González-León *et al.*, 2022). Actuando mediante diversos mecanismos como el micoparasitismo, la competencia por espacio y nutrientes, la producción de enzimas líticas (quitinasas, glucanasas y proteasas) y la liberación de metabolitos secundarios con efecto nematicida y antibiótico (Abdulla *et al.*, 2023).

Además, *Trichoderma* induce la resistencia sistémica en las plantas, fortaleciendo sus defensas naturales frente a ataques de organismos fitoparásitos (de Oliveira *et al.*,

2023). Ante lo expuesto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de *Trichoderma harzianum* sobre la población de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.) variedad Gran William.

Materiales y métodos

Localización de la investigación

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Campus Universitario “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicado en el kilómetro 7,5 de la vía Quevedo-El Empalme, a una altitud de 67 m sobre el nivel del mar. Las coordenadas geográficas del sitio fueron 01° 05' 02" de Latitud Sur y 79° 29' 54" de Longitud Oeste.

Diseño experimental

La investigación se estructuró en dos fases: una *in vitro* y otra *in vivo*. En ambas se evaluaron cuatro cepas de *Trichoderma harzianum* a diferentes concentraciones. Se establecieron seis tratamientos experimentales: cuatro con aplicaciones de *Trichoderma* spp. en concentraciones de 1×10^4 , 1×10^6 , 1×10^8 y 1×10^{10} conidios mL^{-1} , un tratamiento con control químico mediante nematicida, y un tratamiento control sin aplicación. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con seis tratamientos y tres repeticiones. Cada uno de los tratamientos *in vitro* se conformaron por doce cajas Petri y doce plántulas de banano, cultivadas bajo condiciones de invernadero para el ensayo *in vivo*.

Aislamiento e identificación morfológica de *Pratylenchus* spp.

El aislamiento de los nematodos del género *Pratylenchus* spp. se realizó siguiendo la metodología propuesta por de Souza Junior (2023). Se recolectaron cinco muestras de raíces de aproximadamente 100 g, tanto de la planta madre como del hijo, las cuales se sometieron a un proceso de tamizaje para la extracción de los nematodos. Posteriormente, el aislamiento se efectuó de acuerdo con la técnica descrita por de Castillo Castillo *et al.* (2025). Para ello, las raíces se licuaron (100 g) en 500 mL de agua y se dejaron en reposo durante 10 minutos. La suspensión obtenida se filtró a través de un juego de tamices superpuestos con aberturas de 500, 90 y 25 μm , respectivamente. Los restos retenidos en la criba de 90 μm se transfirieron al embudo de Baermann, utilizando papel toalla como filtro y 40 cc de agua destilada. Luego de un periodo de 24 a 48 horas, las formas móviles de los nematodos atravesaron el filtro y se recolectaron en un volumen de 5 a 10 mL de agua.

La identificación morfológica de *Pratylenchus* spp. se realizó mediante observación microscópica con aumentos de 10x y 40x, utilizando las claves taxonómicas propuestas por Bucki *et al.* (2020). La identificación se basó en características morfológicas de las hembras, como la región labial, el estilete, el sistema excretor, el intestino medio, los

órganos reproductivos y la presencia o ausencia de machos, los cuales son poco frecuentes en muchas especies del género. Se tomaron 30 μL de la suspensión para su observación en un portaobjetos.

Multiplicación de *Pratylenchus* spp. en discos de zanahoria

La multiplicación del nematodo se llevó a cabo empleando la técnica de discos de zanahoria descrita por Esteves *et al.* (2019). Se seleccionaron zanahorias frescas y sanas, de forma cilíndrica y aproximadamente 3 cm de diámetro, las cuales fueron peladas, lavadas con agua estéril y cortadas en discos de 3 a 5 mm de espesor. Los discos se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 10 % durante cinco minutos y luego se enjuagaron con agua estéril para eliminar residuos del desinfectante. Posteriormente, fueron flameados, asperjados con alcohol al 90 % y colocados en placas Petri que contenían 25 mL de agar noble al 2 %, suplementado con penicilina a una concentración de 400 mg/500 mL.

Los nematodos obtenidos del aislamiento fueron esterilizados con penicilina y ampicilina, mediante un proceso de centrifugación a 3.500 rpm durante 60 segundos, que se repitió tres veces para garantizar la eliminación de contaminantes. Una vez esterilizados, aproximadamente 50 nematodos en un volumen de 50 μL fueron inoculados en los discos de zanahoria, los cuales se incubaron a 28 °C durante 30 días para permitir su multiplicación. Posteriormente, se cuantificó la población de nematodos obtenida, considerando la relación entre el número de nematodos observados y el volumen de agua empleado en el proceso de extracción.

Cultivo y multiplicación de los aislamientos de *Trichoderma* spp.

Se cultivaron colonias puras de cuatro aislamientos de *Trichoderma* spp. en medio Papa Dextrosa Agar (PDA) al 100 %, ajustado con hidróxido de potasio al 85 %, según la metodología descrita por Abdulla *et al.* (2023). Los cultivos se incubaron a 24 °C durante dos semanas para promover el crecimiento micelial y la esporulación. Posteriormente, se extrajeron discos de 5 mm de diámetro que contenían micelio y estructuras reproductivas, los cuales se transfirieron a nuevas placas Petri con PDA al 100 % en condiciones asépticas para su multiplicación. Los aislamientos se mantuvieron a 24 °C durante dos semanas adicionales. A partir de los cultivos puros de *Trichoderma* spp., se preparó una suspensión de conidios mL^{-1} de acuerdo con el método descrito por Guo *et al.* (2022).

Inoculación *in vitro* de *Trichoderma* spp. contra *Pratylenchus* spp.

La evaluación *in vitro* se efectuó aplicando una suspensión de conidios mL^{-1} de *Trichoderma* spp. (10^2 conidios mL^{-1}) sobre la plataforma de reproducción basada en discos de zanahoria. En cada unidad experimental se enfrentaron los hongos con poblaciones de *Pratylenchus* spp., incluyendo huevos y juveniles (J2). En el caso de los huevos, se colocaron 10 μL

de una suspensión con 10 huevos esterilizados, mientras que para los juveniles se utilizaron 20 μL con 20 individuos. Las observaciones se realizaron cada 12 horas durante un periodo de 2 a 7 días. La viabilidad de los nematodos se determinó observando su movilidad. Se consideró como nematodo muerto aquel que no presentaba movimiento y no recuperaba movilidad ante estímulos mecánicos realizados con una fibra de brocha.

Preparación del suelo y establecimiento del experimento *in vivo*

Para el ensayo *in vivo* se utilizó una mezcla de suelo franco arcilloso y turba negra en una proporción 2,1. El sustrato fue esterilizado mediante solarización durante dos semanas, empleando polímeros plásticos negros para evitar la proliferación de microorganismos contaminantes. Posteriormente, se llenaron fundas plásticas de 12 $\times$ 16 pulgadas con el sustrato solarizado, donde se trasplantaron plántulas meristemáticas de banano variedad Gran William de aproximadamente 10 cm de altura, bajo condiciones controladas de invernadero.

La primera aplicación del biocontrolador se realizó al momento del trasplante. Posteriormente, se realizaron aplicaciones adicionales a los 8, 15, 22, 35 y 45 días después del trasplante (ddt). Las inoculaciones de aproximadamente 12.000 individuos de *Pratylenchus* spp. se realizaron treinta días después del trasplante. La inoculación se realizó mediante perforaciones alrededor del sistema radicular, aplicando la suspensión con una micropipeta.

El tratamiento químico se aplicó a los 45 días después del trasplante, utilizando un nematicida comercial (Fluopyram) en la dosis recomendada por el fabricante. Todas las plántulas recibieron una fertilización básica de 5 g por plántula de un fertilizante completo NPK (10-30-10) a los 20, 30 y 40 días después de la inoculación de *Trichoderma* spp. Los riegos se realizaron dos veces por semana. Durante el periodo experimental se retiraron las hojas senescentes de las plántulas para mantener un estado fitosanitario óptimo.

Variables evaluadas

Determinación de la eclosión de huevos de nemátodos (*in vitro*)

Los huevos de *Pratylenchus* spp. fueron extraídos a partir de raíces infestadas mediante lavado y tamizado, seguido de su purificación en agua destilada estéril. Posteriormente, se cuantificaron utilizando una cámara de conteo y se ajustó la suspensión a una concentración uniforme de 100 huevos por unidad de volumen. Para cada tratamiento, se colocó un volumen determinado de la suspensión de huevos en placas de Petri, a las cuales se añadió la suspensión de conidios de *T. harzianum* a diferentes concentraciones. Las unidades experimentales se incubaron en condiciones controladas de temperatura (25 ± 2 °C). La eclosión de los huevos se evaluó a intervalos de 48 horas mediante observación directa

en microscopio estereoscópico, contabilizando el número de juveniles eclosionados y huevos no eclosionados. El porcentaje de inhibición de la eclosión se calculó en relación con el control, utilizando la proporción de huevos que no lograron eclosionar en cada tratamiento.

Porcentaje de nematodos muertos (*in vitro*)

Se evaluó mediante la observación directa bajo microscopio, registrando el número de nematodos vivos a las 48 horas posteriores a la aplicación del antagonista. Para cuantificar el grado de inhibición se empleó una escala semicuantitativa, donde: 1 = todos los nematodos vivos; 2 = 25 % muertos; 3 = 50 % muertos; 4 = 75 % muertos; 5 = 100 % muertos.

Tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

Se determinó el número de individuos presentes en las placas Petri luego de 48 horas de exposición al antagonista, registrando el porcentaje de nematodos que lograron reproducirse en comparación con el número inicial.

Longitud de raíces (cm)

La longitud radicular se midió desde la base del tallo hasta el extremo de la raíz más larga, utilizando una regla milimetrada al final de la evaluación.

Peso total de raíces por planta (g)

Las raíces de cada plántula se lavaron cuidadosamente para eliminar los residuos de suelo y se registró el peso fresco total (raíces funcionales y dañadas) mediante el uso de una balanza analítica (Ohaus). La medición se efectuó a los 90 días después de la siembra (ddt).

Porcentaje de raíces funcionales

Se consideraron raíces funcionales aquellas que no presentaron daño o necrosis avanzada. El porcentaje de raíces funcionales

se determinó aplicando la siguiente fórmula (ver Ecuación 1):

$$\% \text{ de raíces funcionales} = \frac{\text{número de raíces funcionales}}{\text{número de raíces totales}} \times 100 \quad (1)$$

Tratamiento de los datos

Se verificó los supuestos del análisis de varianza. La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, mientras que la homogeneidad de varianzas se verificó con la prueba de Levene. Una vez comprobados los supuestos, se procedió a realizar un Análisis de Varianza (ANOVA). En los casos en que el ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$), se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey al 95 % de probabilidad. La tabulación de los datos se efectuó en Microsoft Excel, mientras que el análisis estadístico en InfoStat, versión estudiantil 2021.

Resultados

Inhibición de eclosión de huevos (*in vitro*)

En la variable de inhibición de la eclosión de huevos (*in vitro*), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos donde el T5 (Control químico (nematicida)) y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) inhibieron la eclosión de los huevos de *Pratylenchus* con (74 y 70 %) respectivamente. A medida que se disminuye la carga de los conidios de *Trichoderma* spp. la actividad antagonista se ve reducida, donde el tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) con 39 %, el tratamiento T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}) y T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}) ambas con 20 %, en comparación al T6 (Control) que no presentó inhibición eclosión de huevos de nematodos (Figura 1).

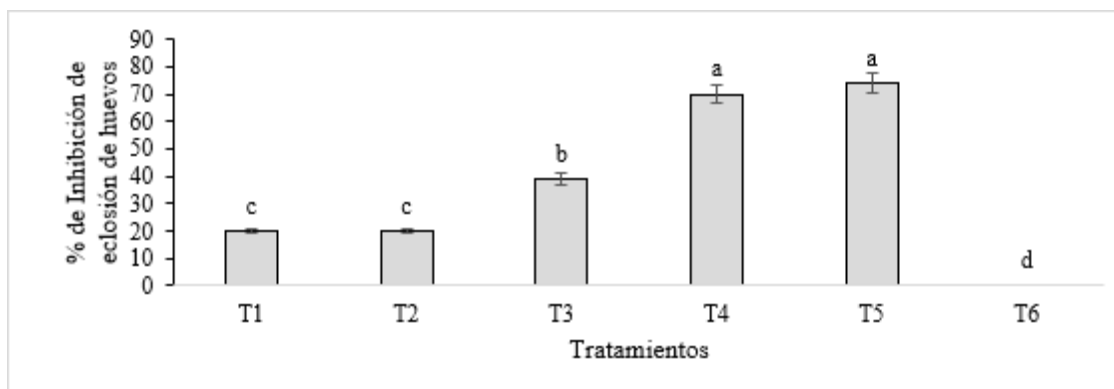


Figura 1. Inhibición de eclosión de huevos de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Porcentaje de nematodos muertos (*in vitro*)

En la variable de número de nematodos muertos (*in vitro*), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. La aplicación de T5 (Control químico (nematicida)) y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) ocasionaron la muerte de mayor del (90 y 87 %) respectivamente. La aplicación del tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) con 70 % de nematodos muertos de estados juveniles (J2). A diferencia del tratamiento T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}) y T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}) con la disminución de las conidios reduce su efectividad antagonista con 50 %, en comparación al T6 (Control) que presentó 5 % de mortalidad (Figura 2).

Tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

En la variable de tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*) en el experimento (*in vitro*), se mostraron diferencias significativas entre tratamientos. La aplicación de T5 (Control químico y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) ocasionaron la menor tasa de reproductividad (10 y 20 %) respectivamente. La aplicación de tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}) y T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}) que tuvieron tasas reproductivas mayores (43, 44 y 48 %) respectivamente, en comparación al T6 (Control) que presentó 90 % de reproductividad (Figura 3).

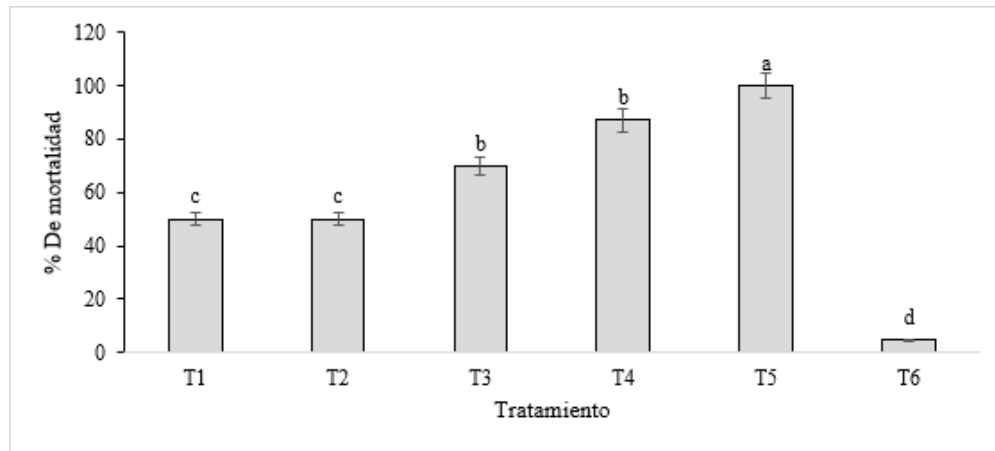


Figura 2. Porcentaje de nematodos muertos (*in vitro*)

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

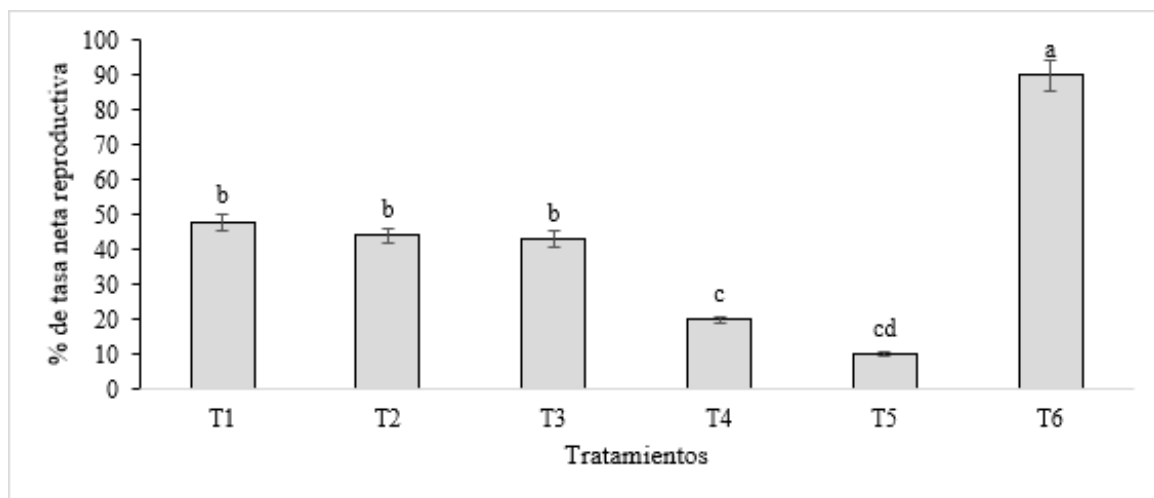


Figura 3. Tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Longitud de raíces (cm)

La aplicación de *Trichoderma harzianum* influyó significativamente en la longitud del sistema radicular de las plántulas de banano. Los tratamientos T5 (control químico) y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) registraron las mayores longitudes de raíz, con valores de 74,48 y 73,38 cm, respectivamente, siendo estadísticamente superiores al resto de los tratamientos. Por su parte, T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}), T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) y T6 (control) presentaron longitudes radiculares de 65,44; 64,66; 63,54 y 65,66 cm, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 4).

Peso total de raíces por plántulas

En el peso total de raíces por plántula se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. El tratamiento T4 (*Trichoderma harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) presentó el mayor peso radicular, con un valor de 195,13 g, siendo estadísticamente superior al resto de los tratamientos evaluados. En contraste, el tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) registró el menor peso de raíces, con 117,73 g, mostrando diferencias significativas respecto a T4. Por otro lado, los tratamientos T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}), T5 (control químico) y T6 (control) presentaron pesos radiculares de 136,00; 147,26; 165,33 y 131,46 g, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 5).

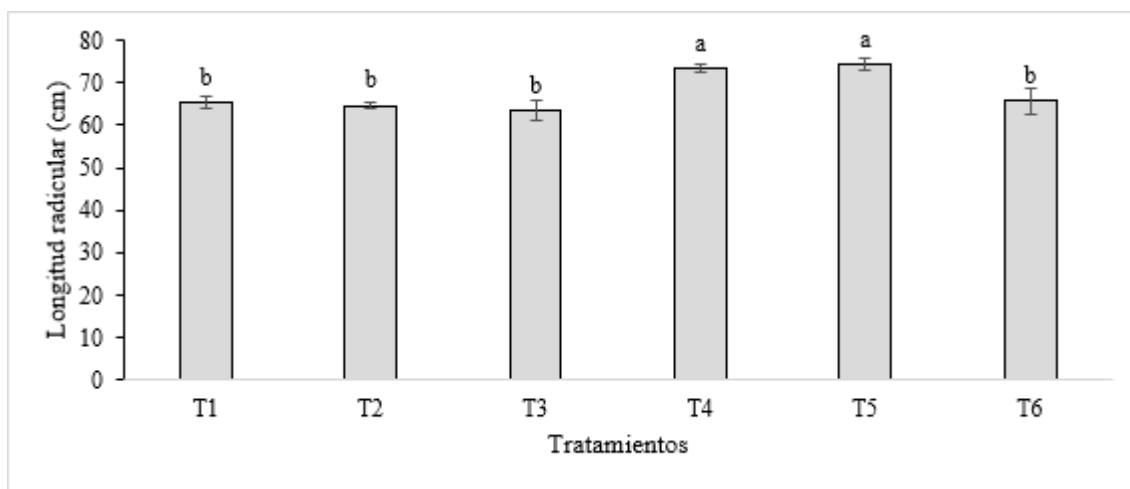


Figura 4. Longitud radicular de las plántulas de banano después de la aplicación de los tratamientos.

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

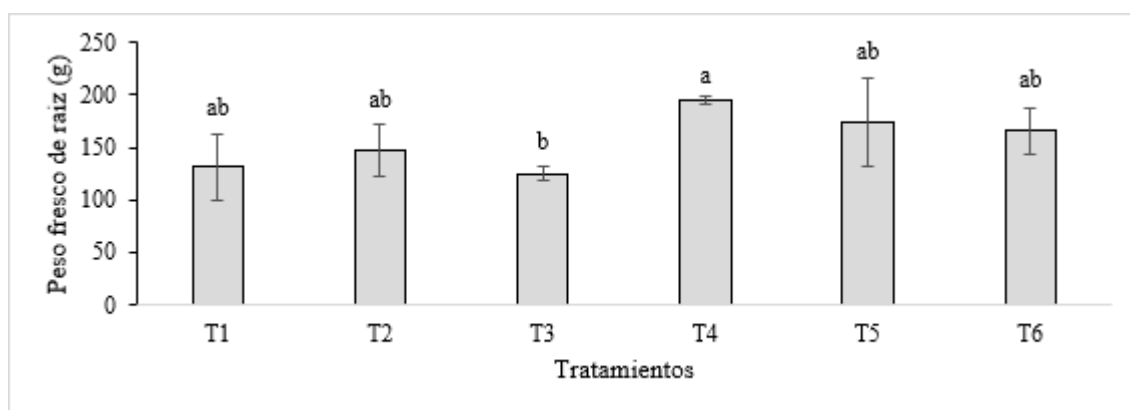


Figura 5. Peso total de raíz de la plántula de banano después de la aplicación de los tratamientos.

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Porcentaje de raíces funcionales

En las variables raíces funcionales por plántula, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. Bajo las condiciones del estudio, la aplicación de *T. harzianum* no generó un efecto sobre la funcionalidad radicular del cultivo de banano.

Discusión

Los resultados obtenidos demostraron que las concentraciones más elevadas de *T. harzianum*, particularmente el tratamiento T4 (1×10^{10} conidios mL^{-1}), ejercieron un efecto significativo en la inhibición de la eclosión de los huevos de *Pratylenchus* spp. La inhibición puede atribuirse a la liberación de metabolitos secundarios y enzimas extracelulares como quitinasas, proteasas y glucanasas, las cuales degradan las cubiertas de los huevos o interfieren en el desarrollo embrionario del nematodo (Nafady *et al.*, 2022). De acuerdo con lo descrito por Singh *et al.* (2023), *T. harzianum* produce compuestos volátiles (6-pentyl- α -pirona, peptaiboles y harzianolidas) que afectan directamente la viabilidad de los huevos de nematodos. Resultados similares fueron reportados por d'Errico *et al.* (2022), quienes observaron una reducción del 68 % en la eclosión de huevos de *Meloidogyne incognita* tras la aplicación de *T. harzianum*.

En la variable número de nematodos muertos (*in vitro*), los tratamientos T4 y T5 mostraron alta mortalidad. La letalidad inducida por *T. harzianum* podría explicarse por su capacidad para parasitar directamente los estadios juveniles del nematodo (J2), adhiriéndose a la cutícula y penetrándola mediante la acción combinada de enzimas líticas y presión mecánica del micelio (Ahmad *et al.*, 2022). Este tipo de interacción micoparasítica ha sido ampliamente documentado por e Silva *et al.* (2022), quienes demostraron que *T. harzianum* causa deformaciones y colapso en la estructura cuticular de *M. javanica*.

En cuanto a la tasa neta reproductiva (*in vitro*), se observó una reducción en los tratamientos T4 y T5, frente al control sin aplicación. Este efecto sugiere una interferencia directa de *T. harzianum* en los procesos reproductivos de *Pratylenchus* spp., posiblemente mediante la producción de compuestos antifecundativos o la alteración de señales químicas que regulan la oviposición (Moo-Koh *et al.*, 2022). Según lo señalado por Kassam *et al.* (2023), *Trichoderma* spp. puede alterar la homeostasis hormonal del nematodo mediante la secreción de ácido indolacético y otros compuestos que interfieren con su fisiología reproductiva.

Respecto a la longitud de raíces, los tratamientos T4 y T5 promovieron un mayor desarrollo radicular, evidenciando el doble efecto del biocontrolador: la supresión de nematodos y la estimulación del crecimiento vegetal. Se sustenta en la capacidad de *T. harzianum* para inducir resistencia sistémica adquirida (ISR) y producir fitohormonas como ácido giberélico y ácido indolacético (IAA), que estimulan la elongación celular y la formación de raíces laterales (Singh *et al.*, 2023).

Alinç *et al.* (2021), reportaron que la aplicación de *T. harzianum* T22 incrementó la longitud radicular en tomate debido a la acción conjunta de metabolitos promotores del crecimiento y la mejora de la absorción de nutrientes. De manera similar, Sanó *et al.* (2022), observaron un incremento de 25 % en la longitud de raíces en plántulas de banano inoculadas con *Trichoderma asperellum*.

En la variable peso total de raíces por plántula, el tratamiento T4 (1×10^{10} conidios mL^{-1}) registró el mayor peso, superando incluso al tratamiento químico. Este incremento puede atribuirse a la mejora en la estructura radicular y a la reducción del estrés causado por la infestación de nematodos, lo cual permite un mayor desarrollo y exploración del suelo (Ganeshan *et al.*, 2021). Además, *Trichoderma* mejora la solubilización de nutrientes y la disponibilidad de fósforo, hierro y micronutrientes, optimizando la eficiencia fotosintética y el metabolismo vegetal (Castillo Castillo *et al.*, 2025). Resultados similares fueron reportados por Castillo-Arévalo (2022a), quienes observaron un aumento del 30 % en el peso radicular de plantas de plátano tratadas con *T. harzianum* frente a los controles no tratados.

Conclusiones

Los resultados demostraron que *Trichoderma harzianum*, particularmente en la concentración de 1×10^{10} conidios mL^{-1} , constituyó una estrategia de biocontrol altamente eficaz para la supresión de *Pratylenchus* spp. en plántulas de banano, al disminuir de manera significativa la eclosión de huevos, la supervivencia de juveniles y la capacidad reproductiva del nematodo. Este efecto antagonista se vio acompañado por mejoras morfofisiológicas en el sistema radicular, expresadas en un incremento notable de la longitud y el peso total de las raíces, lo que confirma un doble efecto de protección fitosanitaria y bioestimulación vegetal. Estos hallazgos posicionan a *T. harzianum* como una alternativa sostenible y prometedora para su integración en programas de manejo integrado de nematodos, permitiendo reducir la dependencia de agroquímicos y fortalecer la resiliencia del cultivo frente a presiones fitoparasitarias.

Referencias

- Abdulla, G. A., Saleh, H. M., y Al-Hakeem, A. M. (2023). Effects of *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma Asperellum* against egg of *meloidogyne incognita* under laboratory condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1213(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012011>
- Ahmad, G., Khan, A., Ansari, S., Khan, A. A., Elhakem, A., Sami, R., y Mohamed, H. I. (2022). Management of root-knot nematode infection by using fly ash and *Trichoderma harzianum* in *Capsicum annum* plants by modulating growth, yield, photosynthetic pigments,

- biochemical substances, and secondary metabolite profiles. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1). <https://doi.org/10.15835/nbha50112591>
- Alinç, T., Cusumano, A., Peri, E., Torta, L., y Colazza, S. (2021). *Trichoderma harzianum* strain T22 modulates direct defense of tomato plants in response to *Nezara viridula* feeding activity. *Journal of Chemical Ecology*, 47(4), 455-462. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01260-3>
- Arboleda-Riascos, C. E., Riascos-Ortiz, D. H., Varón De Agudelo, F., Mosquera-Espinosa, A. T., Oliveira, C. M. G., y Muñoz-Flórez, J. E. (2022). *Pratylenchus araucensis* (Rhabditida: Pratylenchidae) a Widely Distributed Nematode in Musa spp. From Colombia. *Journal of Nematology*, 54(1). <https://doi.org/10.2478/jofnem-2022-0057>
- Beteta Alvarado, V. M., Diaz Dumont, J. R., Oré Cierito, L. E., Loarte Aliaga, W. C., García Curo, G., Diaz Tito, L. P., y Malpartida Gutiérrez, J. N. (2022). El compostaje de cáscara de *Musa paradisiaca* L. para la producción de biogás y biometano como estrategia de preservación de la salud ambiental. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 62(5), 1048-1054. <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2023/05/1428436/594-1733-1-pb.pdf>
- Bucki, P., Qing, X., Castillo, P., Gamliel, A., Dobrinin, S., Alon, T., y Braun Miyara, S. (2020). The genus *Pratylenchus* (Nematoda: Pratylenchidae) in Israel: From taxonomy to control practices. *Plants*, 9(11), 1475. <https://doi.org/10.3390/plants9111475>
- Castillo Castillo, A., Martínez, H. C., Arteaga Alcívar, F. J., y Álava Cruz, D. A. (2025). Rizobacterias y *Trichodermas* antagonistas al control de nematodos fitoparásitos en plátano barraganete (*Musa paradisiaca* L.). *Revista Ciencia y Tecnología*, 18(2), 38-47. <https://doi.org/10.18779/cyt.v18i2.994>
- Castillo-Arévalo, T. (2022a). Alternativas biológicas y químicas para el manejo de Fitonematodos en cultivo de plátano AAB (*Musa paradisiaca* L.) en Rivas, Nicaragua. *Revista Universitaria del Caribe*, 28(01), 95–102. <https://doi.org/10.5377/ruc.v28i01.14449>
- Castillo-Arévalo, T. (2022b). Evaluación in vitro de hongos Hypocreales para el control de *Pratylenchus* ssp, *Scutellonema* ssp y *Helicotylenchus* ssp. *Revista Universitaria del Caribe*, 29(02). <https://doi.org/10.5377/ruc.v29i02.15253>
- Cuzco Jiménez, V. del C., Luna Romero, Ángel E., Carvajal Romero, H. R., y Cervantes Alava, A. R. (2021). Análisis de tendencia de la exportación de banano (*Musa* AAA) en el Ecuador, periodo 1995-2020. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(2), 99–106. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/475>
- d'Errico, G., Greco, N., Viñale, F., Marra, R., Stillitano, V., Davino, S. W., Woo, S. L., y D'Addabbo, T. (2022). Synergistic Effects of *Trichoderma harzianum*, 1,3 Dichloropropene and Organic Matter in Controlling the Root-Knot Nematode *Meloidogyne incognita* on Tomato. *Plants*, 11(21), 2890. <https://doi.org/10.3390/plants11212890>
- de Oliveira, C. M., Oshiquiri, L. H., Almeida, N. O., Steindorf, A. S., da Rocha, M. R., Georg, R. C., y Ulhoa, C. J. (2023). *Trichoderma harzianum* transcriptome in response to the nematode *Pratylenchus brachyurus*. *Biological Control*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105245>
- de Souza Junior, F. J. C. (2023). The root-lesion nematode (*Pratylenchus zeae*) parasitising mandacaru cactus in Northeast of Brazil. *Australasian Plant Disease Notes*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s13314-023-00510-5>
- e Silva, M. T. R., e Silva, B. de A., Alberton, O., Schwengber, R. P., y Dias-Arieira, C. R. (2022). *Rhizophagus clarus* controls *Meloidogyne javanica* and enhances the activity of defense-related enzymes in tomato. *Horticultura Brasileira*, 40(2). <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20220205>
- Esteves, I., Maleita, C., Pato, T., Abrantes, I., y Cunha, M. J. (2019). In vitro reproduction of *Pratylenchus neglectus* on carrot discs and investigation of its interaction with *Meloidogyne hispanica* on potato. *European Journal of Plant Pathology*, 153(3), 957-963. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1582-9>
- Ganeshan, K., Vetrivelkalai, P., Bhagawati, B., Gupta, N., Devrajan, K., Raveendran, M., y Balachandar, D. (2021). Endophytic fungi as potential bio-control agents against root knot nematode, *Meloidogyne incognita* in banana. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 40(29), 7–18. <https://doi.org/10.9734/cjast/2021/v40i2931536>
- González-León, Y., Ortega-Bernal, J., Anducho-Reyes, M. A., y Mercado-Flores, Y. (2022). *Bacillus subtilis* y *Trichoderma*: características generales y su aplicación en la agricultura. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 25(1), 1–14. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.520>
- Guo, R., Li, G., Zhang, Z., y Peng, X. (2022). Structures and biological activities of secondary metabolites from *Trichoderma harzianum*. *Marine drugs*, 20(11), 701. <https://doi.org/10.3390/md20110701>
- Kassam, R., Kranti, K. V. V. S., Yadav, J., Chatterjee, M., Chawla, G., Kundu, A., Hada, A., Thokala, P. D., Shukla, L., Mishra, J., Rana, V. S., Mukhopadhyay, R., Phani, V., y Rao, U. (2023). Exploration of rhizosphere-dwelling nematophagous *Trichoderma* spp. using novel 'bait technique' with root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *Biological Control*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105327>
- López Martínez, T. de los Á., Páramo Aguilera, L. A., y Delgado Silva, H. D. (2022). Reproducción masiva de hongos *Trichodermas* previamente identificados de suelos Nicaragüenses en diferentes sustratos orgánicos.

- Nexo Revista Científica, 35(03), 700-712. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i03.15000>
- Moo-Koh, F. A., Cristóbal-Alejo, J., Andrés, M. F., Martín, J., Reyes, F., Tun-Suárez, J. M., y Gamboa-Angulo, M. (2022). *In Vitro* assessment of organic and residual fractions of nematicidal culture filtrates from thirteen tropical *Trichoderma* strains and metabolic profiles of most-active. *Journal of Fungi*, 8(1), 82. <https://www.mdpi.com/2309-608X/8/1/82>
- Nafady, N. A., Sultan, R., El-Zawahry, A. M., Mostafa, Y. S., Alamri, S., Mostafa, R. G., Hashem, M., y Hassan, E. A. (2022). Effective and Promising strategy in management of tomato root-knot nematodes by *Trichoderma harzianum* and arbuscular mycorrhizae. *Agronomy*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy12020315>
- Nomura, R.B.G., Lopes-Caitar, V.S., Hishinuma-Silva, S. M., Zamboni Machado, A. C., Conrado Meyer, M., y Marcelino-Guimarães, F. C. (2024). *Pratylenchus brachyurus*: status and perspectives in Brazilian agriculture. *Trop. plant pathol.* 49, 573–589. <https://doi.org/10.1007/s40858-024-00669-x>
- Piedra-Bonilla, E., y Echeverría, Y. (2024). Changes in the adaptive capacity of livelihood vulnerability to climate change in ecuador's tropical commodity crops: banana and cocoa. En: Florez, H., Leon, M. (eds) Applied Informatics. ICAI 2023. *Communications in Computer and Information Science*, vol 1874. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46813-1_24
- Sandoval-Ruiz, R., Gómez-Alpizar, L., Humphreys-Pereira, D. A., y Flores-Chaves, L. (2022). Molecular identification of root-lesion nematodes, *Pratylenchus* spp. in agricultural crops from Costa Rica. *Agronomia Mesoamericana*, 34(1). <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.49445>
- Sanó, L., Oliveira, L. L. B. de, Leão, M. D. M., Santos, J. E. de Á. D., Medeiros, S. C. de, Schneider, F., Sousa, A. B. O. de, Taniguchi, C. A. K., Muniz, C. R., Grangeiro, T. B., y Silva, C. de F. B. da. (2022). *Trichoderma longibrachiatum* as a biostimulant of micropropagated banana seedlings under acclimatization. *Plant Physiology and Biochemistry*, 190, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.09.008>
- Singh, P., Singh, R., Madhu, G. S., y Singh, V. P. (2023). Seed biopriming with *Trichoderma harzianum* for Growth promotion and drought tolerance in rice (*Oryza sativa*). *Agricultural Research*, 12(2), 157-162. <https://doi.org/10.1007/s40003-022-00641-8>
- Soto-Valenzuela, J. O., Álvarez-Vera, M. S., Vázquez Vázquez, J. E., y Ricardo Ricardo, G. B. (2024). Evaluación físico, químico y microbiológico del suelo en cultivos de *Musa paradisiaca* Cavendish y *Elaeis guineensis* Jac. Provincia de los Ríos. *Alfa Revista De Investigación En Ciencias Agronómicas Y Veterinarias*, 8(22), 110-125. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i22.252>
- Subash, M, y Perumalsamy, M. (2024). Green degumming of banana pseudostem fibers for yarn manufacturing in textile industries. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(4), 5285-5294. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02850-1>



Efecto de *Ascophyllum nodosum* en el crecimiento y producción del cultivo de zanahoria (*Daucus carota* L.)

Effect of *Ascophyllum nodosum* on growth and yield of carrot (*Daucus carota* L.)

Daniela Alexandra Martínez Vargas¹, Carlos Andrés Bolaños Carriel², Ana Ruth Álvarez Sánchez³, Yordy Ariel Arcos Palma¹, Alex Darling Bravo Sánchez³

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador

²Universidad Central del Ecuador

³Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador

Autor de correspondencia: daniela.martinez9589@utc.edu.ec

Recibido: 14/12/2025. Aceptado: 23/04/2026.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una hortaliza de gran importancia para el Ecuador, su siembra se realiza principalmente en la región Sierra, donde las temperaturas moderadas, humedad constante, suelos sueltos y profundos favorecen el desarrollo de raíces de buena calidad. En la Costa ecuatoriana, el cultivo es menos frecuente debido a temperaturas más altas, mayor humedad relativa y suelos arenosos; condiciones que pueden limitar el desarrollo y rendimiento. Frente a estos desafíos, los bioestimulantes elaborados a partir del alga *Ascophyllum nodosum* (L.) se han convertido en una alternativa prometedora para mejorar el desarrollo del cultivo y promover prácticas agrícolas más sostenibles. Su aplicación contribuye a mejorar la nutrición vegetal favoreciendo la asimilación y optimización del uso de los nutrientes disponibles en el suelo. En este sentido, se evaluó el efecto de cuatro concentraciones de un extracto comercial de *Ascophyllum nodosum* (100, 75, 50 y 25%) en variables de crecimiento y producción del cultivo de zanahoria (variedad Chantenay Red core) bajo condiciones de la región Costa. Se utilizó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA), con seis tratamientos y fertilización mínima. Los resultados mostraron un efecto positivo y significativo ($p < 0,001$) sobre el desarrollo de la planta y el rendimiento de raíz, destacando que las concentraciones de 50 % y 75 % produjeron los mayores valores en las variables evaluadas. Estos resultados sugieren que el bioestimulante a base de A. nodosum puede mejorar el crecimiento y rendimiento de la zanahoria bajo condiciones de la costa ecuatoriana y fertilización limitada.

Palabras clave: algas, agricultura, bioestimulante, sostenibilidad.

Abstract

Carrots (*Daucus carota* L.) are a very important vegetable in Ecuador. They are mainly grown in the Sierra region, where moderate temperatures, constant humidity, and loose, deep soils favor the development of good-quality roots. On the Ecuadorian coast, carrots are grown less frequently due to higher temperatures, higher relative humidity, and sandy soils, conditions that can limit development and yield. Against these challenges, biostimulants made from *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed have become a promising alternative for improving crop development and promoting more sustainable agricultural practices. Their application contributes to improving plant nutrition by promoting the assimilation and optimization of the use of nutrients available in the soil. In this regard, the effect of four concentrations of a commercial extract of *Ascophyllum nodosum* (100, 75, 50, and 25 %) was evaluated on growth and production variables of carrot crops (Chantenay Red core variety) under conditions in the Costa region. A completely randomized block design (CRBD) was used, with six treatments and minimal fertilization. The results showed a positive and significant effect ($p < 0.001$) on plant development and root yield, with the 50 % and 75 % concentrations producing the highest values in the variables evaluated. These results suggest that the A. nodosum-based biostimulant can improve carrot growth and yield under conditions on the Ecuadorian coast and with limited fertilization.

Keywords: algae, agriculture, biostimulant, sustainability.

Introducción

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una planta bianual, herbácea, de la familia Apiaceae (Rodríguez *et al.*, 2021). Es una de las hortalizas más comercializadas a nivel mundial, debido a su alto valor nutritivo y beneficios para la salud humana relacionados a sus propiedades anticancerígenas, antioxidantes y cicatrizantes (Nagraj *et al.*, 2020). El principal país productor de zanahoria es China con alrededor de 18.381.577 toneladas, le sigue Uzbekistán con 3.349.345 toneladas y Estados Unidos con 1.367.587 toneladas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023). En Ecuador, para el año 2023 se cosecharon un total de 6.831 hectáreas de zanahorias y nabos, con una producción de 42.975,68 toneladas anuales (FAO, 2023). Siendo en la región de la Sierra ecuatoriana, donde se alcanzan los mayores rendimientos, en provincias como Chimborazo, Cotopaxi y Tungurahua (Huespe *et al.*, 2022).

La zanahoria presenta un crecimiento vegetativo (formación de la raíz pivotante) y reproductivo (formación de flores, frutos y semillas), por lo cual, para su óptimo desarrollo, el cultivo requiere de suelos sueltos y profundos con un contenido de materia orgánica superior al 3,5 % y un pH entre 5 y 7 (Huespe *et al.*, 2022). Además, aunque se adapta a diversas condiciones climáticas, presenta un rendimiento óptimo en zonas de clima templado, como la Sierra ecuatoriana (Huespe *et al.*, 2022). Sin embargo, en la región costera del Ecuador, caracterizada por temperaturas elevadas y humedad relativa moderada, el cultivo enfrenta desafíos significativos, como el estrés térmico y la aceleración de procesos de envejecimiento, lo cual podría afectar la calidad y el rendimiento de los tubérculos.

En este contexto, el uso de bioestimulantes derivados de algas marinas, ha emergido como una estrategia prometedora para mitigar los efectos adversos del estrés abiótico en esta región, donde se desarrolló el presente estudio. En particular, el alga *Ascophyllum nodosum*, representa una alternativa relevante ya que contiene vitaminas, aminoácidos y sustancias que impulsan a la producción de hormonas como auxinas, citoquininas y ácido giberélico, características que la convierten en un excelente biorregulador (Kumari *et al.*, 2023). Además, funciona en procesos oxidativos, metabólicos y posee macro y micronutrientes que ayudan al crecimiento de las plantas (Pereira *et al.*, 2020).

Con la finalidad de evaluar el potencial real del extracto de alga utilizada bajo las condiciones edafoclimáticas de la región Costa se realizó una fertilización mínima con un fertilizante inorgánico comercial, según concentración del producto. Con lo cual se buscó reducir la influencia de fuentes externas de nutrientes y aislar el efecto fisiológico del bioestimulante sobre el cultivo. Al limitar la fertilización convencional, los resultados obtenidos reflejan principalmente

la respuesta propia del cultivo al alga aplicada, lo que permite determinar con mayor precisión su eficacia en promover el desarrollo vegetativo y el crecimiento radicular en condiciones de nutrición restringida.

En estudios recientes se han utilizado extractos de algas marinas, cuyos resultados han sido significativos en crecimiento y producción en plantas cultivadas en condiciones de invernadero y de campo (Espinosa-Antón *et al.*, 2020). Tal es el caso de hortalizas como tomate (Supraja *et al.*, 2020); sandía (Halfhide y Boodoo, 2020), pepino (Hassan *et al.*, 2021); pimiento (Tian *et al.*, 2022), trigo (Mutum *et al.*, 2023) y leguminosas como soya (Wang *et al.*, 2023).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el comportamiento agronómico y productivo de la zanahoria (*Daucus carota* L.) en la costa ecuatoriana bajo la aplicación de *Ascophyllum nodosum* y un esquema de fertilización mínima como estrategia potencial para una producción agrícola ambientalmente responsable que contribuya a la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios en beneficio de las generaciones presentes y futuras.

Materiales y métodos

Sitio experimental

El experimento se realizó en la finca experimental “La María” ubicada en el km 7,5 vía Quevedo - El Empalme, Cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador. Situada geográficamente a una altura de 120 m sobre el nivel del mar y a 1°04'53.9"S y 79°30'10,1"W. Con una temperatura promedio de 25,4 °C, precipitación de aproximadamente 1.642 mm anuales y una topografía irregular (INAMHI, 2025).

El suelo del sitio experimental fue caracterizado mediante un análisis físico-químico previo a la instalación del estudio, realizado en el laboratorio de suelos, tejidos vegetales y aguas de la Estación Experimental Tropical Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Esta caracterización inicial permitió establecer la línea base de las propiedades edáficas para evaluar el efecto del alga en el cultivo (ver Tabla 1).

El suelo del sitio experimental presentó un pH medianamente ácido. El contenido de nitrógeno amoniacal fue bajo (11–16 mg/kg), mientras que el fósforo disponible se encontró en niveles medios (10–11 mg/kg). El potasio mostró en general valores adecuados. El contenido de calcio y magnesio fueron adecuados en todas las muestras analizadas. Estas condiciones reflejan un suelo con fertilidad media y posibles limitaciones nutricionales, lo cual justifica el empleo de un bioestimulante.

Tabla 1. Análisis de suelo del sitio experimental

Nº muestra	pH	NH ₄	P	K	Ca	Mg
		mg/kg		meq/100 ml		
1	5,5	12	10	1,47	11	3,6
2	5,5	13	11	0,38	11	2,3
3	5,6	11	11	0,77	10	2,3
4	5,6	16	11	0,66	10	2,1

Manejo del experimento

Debido a la buena adaptación a las condiciones de la región Costa, su aceptación comercial y capacidad para producir raíces uniformes y de buen peso individual. Se utilizaron semillas certificadas de zanahoria (*Daucus carota* L.) de la variedad Chantenay red core como material de siembra. Estas características la convierten en una variedad estable y adecuada para evaluar con claridad los efectos de los tratamientos aplicados en el ensayo.

Estas semillas se depositaron de forma manual directamente en el campo a una profundidad de 3 mm en época seca. Posterior a la siembra, se realizó el raleo en cuanto las plantas mostraron hojas verdaderas. El suministro de agua al cultivo se realizó dos veces a la semana.

Se utilizó un bioestimulante comercial formulado a partir del alga *Ascophyllum nodosum*, el cual contiene un 22 % p/v de materia seca (extracto de *A. nodosum*) y un 4,40% p/v de carbono orgánico. Se evaluaron cuatro concentraciones: 100 %, 75 %, 50 % y 25 %, adicional un tratamiento correspondiente a fertilización química y otro de control. La aplicación se realizó vía edáfica, iniciando a los 15 días después de la siembra y repitiéndose en dos ocasiones más con intervalos de 15 días entre aplicaciones.

Todos los tratamientos a excepción del control fueron fertilizados en la misma dosis mínima con un fertilizante inorgánico comercial, según recomendaciones del fabricante. Este fertilizante contiene varios nutrientes esenciales para el crecimiento del cultivo de zanahoria, destacando el nitrógeno (N) con una concentración del 16,51 %; el fósforo (P₂O₅) con 20,65 % y el potasio (K₂O) con 12,44 %. Además, contiene zinc (Zn) al 1,06 %, y boro (B) al 0,66 %.

En cuanto a manejo fitosanitario, el control convencional de maleza se llevó a cabo de forma manual una vez por semana. No hubo presencia de patógenos ni insectos plagas, por tanto, no fue necesario el uso de plaguicidas. Se cosechó manualmente una vez que toda la plantación había alcanzado madurez fisiológica (90 días).

Diseño experimental

Se usó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), formado por 6 tratamientos y 4 repeticiones cada uno (ver Tabla 2). El área total utilizada para el experimento fue de 69 m² y el tamaño de las parcelas de 9 m². Se realizaron 4 surcos por parcela, empleando una distancia de siembra de 30 cm

entre plantas, obteniendo un total de 40 plantas por parcela y 240 plantas en total por el experimento.

Tratamientos evaluados

Tabla 2. Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Dosis extracto	Repeticiones
T1	<i>A. nodosum</i> 100 % + fertilización química	4
T2	<i>A. nodosum</i> 75 % + fertilización química	4
T3	<i>A. nodosum</i> 50 % + fertilización química	4
T4	<i>A. nodosum</i> 25 % + fertilización química	4
T5	Fertilización química	4
T6	Control experimental	4

Variables evaluadas

Las mediciones de las variables vegetativas se realizaron a los 30, 45 y 60 días después de la siembra. Las variables evaluadas incluyeron: altura de planta (cm), medida desde el suelo hasta el ápice de la hoja superior; largo de la hoja (cm), que se registró desde la base de la hoja más alta hasta su ápice; ancho de la hoja (cm), que corresponde al ancho de la misma hoja en la que se registró el largo; y número de hojas, con registros periódicos del total de hojas presentes en cada individuo.

Además, se registraron las variables de producción una vez que la zanahoria alcanzó su madurez fisiológica para ser cosechada. Las variables de producción incluyeron: altura de planta (cm), que se midió desde la punta de la raíz hasta el ápice de la hoja más alta de la planta, largo de la raíz (cm), medido desde la corona de la zanahoria hasta el ápice de la raíz; diámetro de la raíz (cm), tomado en la parte más ancha de la raíz; y peso de la raíz (g), registrado en el momento de la cosecha. Adicional, se evaluaron variables de laboratorio: la biomasa húmeda (g) se determinó mediante el pesaje de toda la parte vegetativa de la planta de zanahoria, incluyendo hojas y tallos. Este procedimiento se realizó inmediatamente después de la cosecha, sin realizar ningún tratamiento previo a la muestra. En el caso de la biomasa seca (g), la muestra fue sometida a un proceso de secado en estufa a una temperatura constante de 65 °C durante un período de

48 horas. Durante este proceso, las muestras se colocaron en bandejas de aluminio para asegurar una distribución uniforme del calor y una correcta eliminación de la humedad. Después de completar el secado, las muestras fueron enfriadas en un desecador para evitar la reabsorción de humedad y luego se procedió a su pesaje final.

Análisis estadístico

Los tratamientos se analizaron mediante un ADEVA de un factor. Para determinar las diferencias significativas se utilizó la prueba de rangos múltiples de Tukey ($p < 0,05$) para comparar las medias entre los tratamientos. Para el análisis de los datos se utilizó el software estadístico InfoStat v.2023 (Di Rienzo *et al.*, 2023).

Resultados

Los resultados obtenidos a los 30 días después de siembra (DDS), después de la primera aplicación de *A. nodosum*, se presentan en la Tabla 3. Para la altura de planta, los tratamientos mostraron diferencias significativas ($p = 0,0011$), con valores promedio entre 11,28 cm (T1) y 15,68 cm (T5), con una media general de 13,27 cm. El tratamiento con fertilización química (T5) presentó la mayor altura, superando significativamente a los tratamientos con 100 % (T1) y 25 % (T4) del producto, mientras que el control (T6) mostró un comportamiento intermedio. Estos resultados indican un efecto positivo de la fertilización química sobre el crecimiento inicial de las plantas.

En cuanto a las variables foliares, se observaron diferencias significativas para ancho de hojas ($p = 0,0052$),

longitud de hojas ($p = 0,0044$) y número de hojas ($p = 0,0082$). El tratamiento con 25 % del extracto de alga (T4) presentó consistentemente los valores más bajos, diferenciándose del resto de los tratamientos, mientras que las dosis intermedias (50–75 %, T3–T2) y el fertilizante químico (T5) mostraron valores similares entre sí. Destaca el tratamiento con 50 % (T3), que presentó el mayor número de hojas, ancho y longitud foliar comparables al fertilizante químico, evidenciando una tendencia general de superioridad de las aplicaciones intermedias del biofertilizante sobre las dosis más altas.

Posterior a la segunda aplicación, a los 45 DDS, se observaron cambios significativos en las variables vegetativas, como se presenta en la Tabla 4. La altura de planta mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), siendo mayor con la aplicación de *A. nodosum* al 50 % (29,50 cm), superando significativamente a las concentraciones de 25 % y 100 %. La fertilización química presentó un valor intermedio (25,88 cm), similar estadísticamente a T3 (50 %), aunque inferior numéricamente.

De igual forma, se observaron efectos significativos sobre las variables foliares ($p < 0,05$). Para el ancho de hojas, los valores del T3 fueron comparables a los del fertilizante químico, destacando su superioridad frente al T4. La longitud de hojas fue mayor en los tratamientos con 50 y 75 % de *A. nodosum*, mientras que el número de hojas alcanzó su máximo con las concentraciones de 50 y 75 %, evidenciando nuevamente una tendencia general de superioridad numérica en el tratamiento T3 (50 %).

Tabla 3. Efecto de *A. nodosum* sobre las variables vegetativas del cultivo de zanahoria posterior a la primera aplicación 30 DDS

Tratamientos	Altura de planta	Ancho de hojas	Longitud de hojas	Número de hojas
T1: 100 %	11,28 c	5,78 a	5,55 a	3,33 bc
T2: 75 %	12,38 bc	5,91 a	5,35 a	4,13 ab
T3: 50 %	13,84 abc	6,28 a	5,61 a	4,30 a
T4: 25 %	11,60 c	3,95 b	3,80 b	3,15 c
T5: Fert. química	15,68 a	6,00 a	5,94 a	3,75 abc
T6: control	14,83 ab	5,60 ab	5,30 a	4,00 abc
$\bar{x}$	13,27	5,59	5,26	3,78
P > F	0,0011	0,0052	0,0044	0,0082

Tabla 4. Efecto de *A. nodosum* sobre las variables vegetativas del cultivo de zanahoria luego de la segunda aplicación 45 DDS

Tratamientos	Altura de planta	Ancho de Hojas	Longitud de hojas	Número de hojas
T1: 100 %	21,30 b	13,28 ab	12,93 a	5,85 b
T2: 75 %	25,79 ab	14,33 ab	13,94 a	8,28 a
T3: 50 %	29,50 a	17,56 a	14,80 a	8,83 a
T4: 25 %	19,58 b	9,43 b	8,88 b	5,03 b
T5: Fert. química	25,88 ab	12,75 ab	12,70 a	5,60 b
T6: control	23,08 ab	11,10 b	11,60 ab	4,98 b
$\bar{x}$	24,19	13,07	12,47	6,43
P > F	0,006	0,0041	0,0006	0,0000

A los 60 DDS, después de la tercera aplicación, se observaron cambios significativos en las variables vegetativas, como se muestra en la Tabla 5. La altura de planta presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), destacando los mejores resultados con la aplicación de *A. nodosum* al 75 % (T4, 34,78 cm), estadísticamente similar al fertilizante químico y al T3 (50 %). Estos resultados confirman la tendencia observada en las evaluaciones anteriores, indicando que las dosis intermedias de biofertilizante favorecen un crecimiento superior frente a las dosis extremas.

De manera consistente con las mediciones previas, el uso de *A. nodosum* tuvo un efecto significativo sobre las variables foliares ($p < 0,05$). El ancho de hojas mostró valores similares a la fertilización química para las concentraciones de 25, 50, 75 y 100 %. La longitud de hojas alcanzó su valor máximo con la concentración de 50 % (18,98 cm), mientras que el número de hojas fue mayor con las concentraciones de 50 y 75 % (11,83 y 12,35 hojas, respectivamente). En contraste, los tratamientos con 25 % y 100 % presentaron menor desempeño en varias variables.

Tabla 5. Efecto de *A. nodosum* sobre las variables vegetativas del cultivo de zanahoria posterior a la tercera aplicación 60 DDS

Tratamientos	Altura de planta	Ancho de hojas	Longitud de hojas	Número de hojas
T1: 100 %	26,73 b	16,03 a	16,30 ab	8,18 b
T2: 75 %	34,78 a	19,80 a	18,08 ab	12,35 a
T3: 50 %	34,58 a	19,33 a	18,98 a	11,83 a
T4: 25 %	28,05 ab	15,23 a	14,95 b	6,88 b
T5: Fert. química	34,65 a	19,95 a	18,45 ab	7,75 b
T6: control	33,98 ab	19,75 a	17,90 ab	8,00 b
$\bar{x}$	32,13	18,35	17,44	9,16
P > F	0,0046	0,0172	0,0302	0,0003

Una vez alcanzada la madurez fisiológica, se evaluaron las variables productivas del cultivo, incluyendo altura total (raíz + tallo), diámetro de raíz, biomasa fresca y biomasa seca, cuyos resultados se presentan en la Tabla 6. La altura mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,03$), con un promedio general de 57,3 cm. La mayor altura

se observó en el tratamiento T2 (75 %), alcanzando 61,5 cm, estadísticamente superior al T4 (25 %), que registró 53,8 cm. Los demás tratamientos, incluidos T1 (100 %), T3 (50 %), T5 (fertilización química) y T6 (control), se ubicaron en valores intermedios (55,6–58,1 cm), sin diferir significativamente de los extremos.

En relación con el diámetro de raíz, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,25$), a pesar de que T2 (75 %) presentó el mayor valor con 6,75 cm y T4 (25 %) el menor con 3,53 cm. Sin embargo, el peso de la raíz mostró diferencias significativas ($p = 0,03$), destacando T2 (75 %) con 171,1 g, superando al T4 (25 %) que alcanzó 109,3 g, mientras que los demás tratamientos se ubicaron en un rango intermedio (135–154 g). De manera similar, tanto la biomasa fresca como la seca presentaron diferencias significativas ($p = 0,02$ y $p = 0,03$, respectivamente), siendo T2 (75 %) el tratamiento con los valores más altos con 106,6 g y 32,0 g, mientras que T4 (25 %) registró los menores con 65,3 g y 22,8 g. Los tratamientos restantes mostraron resultados intermedios sin diferencias significativas.

Estos resultados indican que la aplicación intermedia del biofertilizante promueve un crecimiento vegetativo vigoroso, aumentando la acumulación de biomasa y la eficiencia en la producción de materia orgánica, mientras que las dosis bajas

limitan la productividad. La fertilización química mostró resultados comparables a las aplicaciones intermedias, lo que sugiere que los biofertilizantes pueden funcionar como una alternativa efectiva para complementar la fertilización química sin comprometer el rendimiento del cultivo.

El análisis de rendimiento mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p > F = 0,03$). El mayor rendimiento se registró en T2 (75 %), con 3.042,49 kg.ha⁻¹, destacándose significativamente frente a los tratamientos con dosis bajas y al control. El tratamiento con dosis máxima T1 (100 %) alcanzó 2.742,96 kg.ha⁻¹, ubicándose en el mismo grupo estadístico que T3 (50 %), T5 (fertilización química) y T6 (control), lo que indica que un aumento en la dosis no necesariamente incrementa la producción. Por su parte, T4 (25 %) presentó el menor rendimiento (1.942,82 kg.ha⁻¹), significativamente inferior al resto, evidenciando que dosis muy bajas resultan insuficientes para cubrir los requerimientos nutricionales (ver Tabla 7).

Tabla 6. Efecto de *A. nodosum* sobre los parámetros productivos del cultivo de zanahoria al alcanzar la madurez fisiológica

Tratamiento	Altura total (cm)	Diámetro raíz (cm)	Peso de raíz (g)	Biomasa fresca (g)	Biomasa seca (g)
T1: 100 %	57,5 ab	4,54 a	154,3 ab	87,4 ab	25,2 ab
T2: 75 %	61,5 a	6,75 a	171,1 a	106,6 a	32,0 a
T3: 50 %	57,1 ab	4,52 a	147,4 ab	74,9 ab	24,1 ab
T4: 25 %	53,8 b	3,53 a	109,3 b	65,3 b	22,8 b
T5: Fert. Química	55,6 ab	4,30 a	135,1 ab	81,5 ab	27,5 ab
T6: control	58,1 ab	4,61 a	147,0 ab	88,9 ab	25,7 ab
$\bar{x}$	57,3	4,70	144,1	84,1	26,2
P > F	0,03	0,25	0,03	0,02	0,03

Tabla 7. Efecto de *A. nodosum* sobre el rendimiento del cultivo de zanahoria

Tratamiento	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	
T1: 100 %	2.742,96	ab
T2: 75 %	3.042,49	a
T3: 50 %	2.620,93	ab
T4: 25 %	1.942,82	b
T5: Fertilización química	2.402,44	ab
T6: control	2.313,84	ab
$\bar{x}$	2.560,91	
P > F	0,03	

El rendimiento promedio del ensayo fue de 2.560,91 kg.ha⁻¹; aunque los pesos individuales de raíz estuvieron dentro de lo esperado para la variedad Chantenay Red Cored según González *et al.* (2010), la productividad por hectárea

fue relativamente baja. Esto puede atribuirse principalmente a la reducción de la densidad efectiva de plantas por unidad de superficie, debido a pérdidas durante el ciclo y de raíces no comerciales. Adicionalmente, el efecto de borde característico de parcelas experimentales pequeñas contribuyó a disminuir la cantidad total de biomasa cosechada, explicando la discrepancia entre el buen tamaño individual de raíz y el rendimiento expresado en kg.ha⁻¹.

Discusión

El análisis de suelo inicial reveló un pH ligeramente ácido (5,5–5,6) y bajos niveles de nitrógeno disponible, mientras que los contenidos de fósforo, potasio, calcio y magnesio se encontraban en rangos moderados según interpretación del laboratorio. Esto sugiere que el cultivo pudo beneficiarse de un aporte externo de nutrientes. Lo cual se revela en el tratamiento control, que presentó valores similares a los mejores tratamientos en la primera medición, lo que evidencia

una buena fertilidad inicial del suelo que favoreció el desarrollo temprano del cultivo.

En la primera medición de las variables vegetativas del cultivo (30 DDS) se evidenció para la variable altura de planta, que la fertilización química convencional presentó el mayor valor, indicando una mayor eficiencia en la promoción del crecimiento vegetativo inicial. Sin embargo, los tratamientos con extracto de *Ascophyllum nodosum* mostraron una respuesta dosis-dependiente, siendo el 50 % el que alcanzó los mejores resultados entre los tratamientos con alga. Tanto la concentración más baja (25 %) como la más alta (100 %) registraron alturas significativamente menores, lo que sugiere que existe un rango óptimo de aplicación, mientras que una sobredosis puede generar efectos inhibitorios sobre el crecimiento vegetativo.

En la segunda medición, a los 45 DDS, se marca una tendencia a una mejora de las variables con respecto al tratamiento con 50 % de aplicación del producto en comparación a los demás, lo cual coincide con el estudio de Ali *et al.* (2019), donde se menciona que las aplicaciones foliares de una dosis intermedia del producto (0,5 %) de extracto de *A. nodosum* en cultivo de tomate y pimiento dulce en un ambiente tropical, a intervalos de 10 días resultaron en un aumento significativo ($p < 0,05$) en los parámetros de crecimiento de las plantas, incluyendo la altura de la planta (40 %), el número de hojas (50 %), la biomasa seca de la planta (52 %), la longitud de la raíz (59 %) y el contenido de clorofila (20 %) en comparación con el control. Además, las plantas tratadas también tuvieron un número significativamente mayor de racimos florales, número de flores, frutos por racimo y rendimiento total de frutos cosechados.

En la tercera medición de las variables vegetativas, la tendencia se mantuvo, evidenciándose que la altura de planta, la longitud de hojas y el número de hojas fueron estadísticamente superiores en comparación con los demás tratamientos. Durante las fases tempranas del cultivo, la aplicación de una dosis del 50 % de extracto de *Ascophyllum nodosum* promovió valores más altos en altura y desarrollo foliar, lo que sugiere un efecto positivo sobre el crecimiento vegetativo inicial. En este sentido, Kumari *et al.* (2023) señalan que el uso de extractos de algas marinas, particularmente de *Ascophyllum nodosum*, mejora significativamente el crecimiento vegetativo en diversas especies, como *Petunia* y *Ageratum*.

Sin embargo, al final del ciclo, el tratamiento con 75 % fue el que alcanzó mayores valores en las variables productivas (diámetro y peso de raíz, biomasa fresca y seca). Esto sugiere que la dosis óptima para maximizar la productividad no coincide necesariamente con la que produce el crecimiento vegetativo más rápido, y que el extracto de alga actúa de manera diferenciada según la estructura vegetal y la fase del cultivo, favoreciendo la acumulación de biomasa en raíces a dosis ligeramente mayores. En concordancia con lo anterior, Kumari *et al.* (2023), señalan que los efectos positivos se logran principalmente cuando se aplican bajas concentraciones

del extracto. En estas dosis reducidas, estos productos regulan diversos procesos fisiológicos que estimulan el crecimiento, mejoran la eficiencia en la absorción de nutrientes y ayudan a las plantas a tolerar mejor el estrés biótico y abiótico.

La aplicación de *A. nodosum* contribuye significativamente al desarrollo vegetativo y productivo de la zanahoria. Esto coincide con estudios previos en otras hortalizas, como cebolla, donde concentraciones intermedias (0,55 %) de *A. nodosum* promovieron el mayor crecimiento vegetativo y rendimiento (altura de planta, número de hojas, tasa de crecimiento del cultivo y peso del bulbo) (Hidangmayum y Sharma, 2017). En el presente experimento, los tratamientos con 50 y 75 % de la dosis, mostró los valores más altos en gran parte de las variables evaluadas: altura de planta, ancho y longitud de hoja, número de hojas, diámetro y peso de raíz, así como biomasa fresca y seca.

El mayor diámetro y peso de la raíz indican que el sistema radical desarrolló mayor capacidad de exploración del suelo y acumulación de fotoasimilados, reflejado también en la biomasa fresca y seca. Además, al superar el rendimiento de los otros tratamientos, este resultado revela que existe una dosis óptima de bioestimulante, en este caso 75 %, más eficaz que la dosis máxima (100 %) o las más bajas, lo que coincide con estudios de respuesta dosis-efecto en bioestimulantes (Shukla *et al.*, 2019; Kumari *et al.*, 2023). En resumen, estos datos apoyan la hipótesis de que el extracto de *A. nodosum* puede mejorar significativamente el desarrollo y rendimiento de la zanahoria y, aunque no se midió directamente la reducción de fertilizante, el incremento en biomasa sugiere un uso más eficiente de los insumos aplicados.

Según el estudio “Comportamiento de algunas variedades de zanahoria (*Daucus carota* L.) durante el año 2016, en la zona de Vidra” de Șovărel *et al.* (2017), la variedad Chantenay Red Cored destacó por presentar los valores más altos en todos los parámetros evaluados, alcanzando un peso promedio de raíz de 130,2 g y un diámetro de 3,9 cm. En el presente estudio, los resultados obtenidos fueron superiores en el tratamiento T2 (75 %), donde se registró un peso promedio de raíz de 171,11 g y un diámetro de 6,75 cm. Esta diferencia sugiere que, bajo las condiciones experimentales empleadas y con la aplicación del bioestimulante a base de *Ascophyllum nodosum*, la variedad puede expresar un mayor potencial de desarrollo radicular; lo cual evidencia una respuesta favorable del cultivo y resalta el efecto positivo del tratamiento en el crecimiento individual de las raíces.

Conclusiones

La aplicación de extractos de *Ascophyllum nodosum* tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento vegetativo y el rendimiento del cultivo de zanahoria, evidenciando mejoras en parámetros como número de hojas, longitud de raíz y peso fresco en comparación con el control sin aplicación. La implementación de una fertilización mínima permitió evaluar

con mayor claridad la respuesta del cultivo al bioestimulante, dado que la zanahoria cuenta con un sistema radicular eficiente capaz de explorar el suelo en busca de nutrientes.

Los tratamientos con dosis intermedias del extracto mostraron los mejores resultados, lo que sugiere que la eficiencia del bioestimulante depende de una concentración equilibrada que favorezca la absorción de nutrientes sin generar un gasto energético excesivo en la planta. Por otra parte, el uso de *A. nodosum* constituye una alternativa sostenible para los sistemas agrícolas de la costa ecuatoriana, contribuyendo a optimizar la eficiencia de los fertilizantes químicos y a reducir el impacto ambiental asociado a su uso.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, a la carrera de Ingeniería agropecuaria (Campus La María) por proporcionar el terreno y las instalaciones del laboratorio, lo que permitió la realización de este estudio.

Referencias bibliográficas

- Ali, O., Ramsubhag, A. y Jayarama extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environme n, J. (2019). Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* nt. *PLoS One*, 14(5). <https://url-shortener.me/DCG1>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2020). [Software de cómputo]. Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>
- Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., y González-González, M. (2020). Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas. *Biotecnología Vegetal*, 20(4), 257-282. <https://url-shortener.me/DCF1>
- González, G., Vanegas, J., y Vergara, A. (2010). *Manual de zanahoria minimamente procesada: Variedades Chantenay y Baby*. https://www.researchgate.net/publication/317177781_Manual_de_zanahoria_minimamente_procesada_Variedades_Chantenay_y_Baby
- Halfhide, T., y Boodoo, M. (2020). Microalgal Harvesting considering Moringa and Watermelon Seeds as Natural Flocculants. *Farm and Business-The Journal of the Caribbean Agro-Economic Society*, 12(1), 20-26. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.307708>
- Hassan, S. M., Ashour, M., Sakai, N., Zhang, L., Hassanien, H. A., Gaber, A. y Ammar, G. (2021). Impact of seaweed liquid extract biostimulant on growth, yield, and chemical composition of cucumber (*Cucumis sativus*). *Agriculture*, 11(4), 320. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040320>
- Hidangmayum, A. y Sharma, R. (2017). Effect of different concentrations of commercial seaweed liquid extract of *Ascophyllum nodosum* as a plant biostimulant on growth, yield, and biochemical constituents of onion (*Allium cepa* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(4), 658–663. <https://url-shortener.me/3E81>
- Huespe, D., Solaro, C. y Ponce, J. P. (2022). Ensayo comparativo de rendimiento de Zanahoria (*Daucus carota* L.) para dos fechas diferentes de cosecha en la Región Semiárida Pampeana. *Semiárida*, 32(2), 57-64. [https://doi.org/10.19137/semiárida.2022\(02\).57-64](https://doi.org/10.19137/semiárida.2022(02).57-64)
- INAMHI. (2025). *Estación Meteorológica Pichilingue* [Datos meteorológicos]. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). <https://inamhi.gob.ec/info/>
- Kumari, S., Sehrawat, K. D., Phogat, D., Sehrawat, A. R., Chaudhary, R., Sushkova, S. N., Voloshina, M.S., Rajput, V.D., Shmaraeva, A.N. y Shende, S. S. (2023). *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis, a pivotal biostimulant toward sustainable agriculture: A comprehensive review. *Agriculture*, 13(6), 1179. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061179>
- Mutum, L., Janda, T., Darkó, É., Szalai, G., Hamow, K. Á. y Molnár, Z. (2023). Outcome of Microalgae Biomass Application on Seed Germination and Hormonal Activity in Winter Wheat Leaves. *Agronomy*, 13(4), 1088. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041088>
- Nagraj, G. S., Jaiswal, S., Harper, N. y Jaiswal, A. K. (2020). Carrot. *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables*, 323–337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00020-9>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Cultivos y productos de ganadería*. <https://url-shortener.me/3DZV>. (Consultado el 12 de septiembre de 2025)
- Pereira, L., Morrison, L., Shukla, P. S. y Critchley, A. T. (2020). A concise review of the brown macroalga *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis. *Journal of Applied Phycology*, 32, 3561-3584. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02246-6>
- Rodríguez-Izquierdo, L., China-Horta, A., Falcón-Rodríguez, A. y Ramos-León, J. Z. (2021). Crecimiento y relación fuente-demanda en plantas de zanahoria bioestimuladas con Quitomax® y Pectimorf®. *Cultivos Tropicales*, 42(4), 1-21. <https://url-shortener.me/DCIK>
- Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T. y Prithiviraj, B. (2019). *Ascophyllum nodosum*-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science*, 10, 655. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>

- Șovărel, G., Maior, L., Ivan, G. y Acatrinei, I. (2017). *Behavior of some carrot cultivars (Daucus carota L.) during 2016, in Vidra area. Current Trends in Natural Sciences*, 6(11), 53–57. <https://url-shortener.me/DCJ8>
- Supraja, K. V., Behera, B. y Balasubramanian, P. (2020). Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. *Industrial Crops and Products*, 151, 112453. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453>
- Tian, S. L., Khan, A., Zheng, W. N., Song, L., Liu, J. H., Wang, X. Q. y Li, L. (2022). Effects of Chlorella extracts on growth of *Capsicum annuum* L. seedlings. *Scientific Reports*, 12(1), 15455. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19846-6>
- Wang, M., Yin, Z., Sun, W., Zhong, Q., Zhang, Y. y Zeng, M. (2023). Microalgae play a structuring role in food: Effect of spirulina platensis on the rheological, gelling characteristics, and mechanical properties of soy protein isolate hydrogel. *Food Hydrocolloids*, 136, 108244. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108244>



Uso de compost e insecticidas botánicos en huertos familiares

Use of Compost and Botanical Insecticides in Family Gardens

Fernando Simón Herrera Herrera¹, Ángel Monserrate Guzmán Cedeño², Angie Abigail Gallo Encarnación³, Gines Jesús Mero Vera¹

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador

²Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López / Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador

³ENVAFRON-Envasadora Fronteriza de Insumos Acuicolas y Agrícolas CIA, Ecuador

Autor de correspondencia: aguzman@espam.edu.ec

Recibido: 15/12/2025. Aceptado: 12/03/2026.
Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

Este presente estudio evaluó la eficacia de compost enriquecido con microorganismos eficientes (EM) y formulaciones botánicas en la producción de hortalizas. La investigación constó de dos fases bajo un diseño completamente al azar con tres réplicas. En la primera fase, se desarrolló un inóculo con cepas de *Bacillus cereus*, *B. subtilis*, *Trichoderma longibrachiatum* y *Serratia surfactantfaciens*, incorporado a una mezcla de cáscara de maní y bovinaza. El compost inoculado superó al convencional en parámetros físico-químicos y microbiológicos, cumpliendo con la normativa de abonos orgánicos y potenciando el rendimiento agrícola. En la segunda fase, se evaluó el control fitosanitario en pimiento (*Capsicum annuum*), pepino (*Cucumis sativus*) y tomate (*Solanum lycopersicum*). Se aplicaron tres tratamientos (T1: ruda, neem, barbasco; T2: ají, neem, orégano; T3: ajo, neem, albahaca) en concentraciones del 20 % y 30 %. Los datos se analizaron mediante la prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$). Las plagas identificadas incluyeron *Frankliniella* spp., *Aphis* spp., *Bemisia tabaci*, *Spodoptera* spp. y *Tetranychus urticae*. Los tratamientos T2 y T3 destacaron por su mayor eficacia y productividad, especialmente en pimiento y pepino. Se concluyó que la efectividad de los bioinsecticidas depende de la selección estratégica de extractos según la plaga específica, el cultivo y la concentración de los ingredientes activos.

Palabras clave: hortalizas inóculo, microorganismos eficientes, plagas, producción.

Abstract

This study evaluated the efficacy of compost enriched with effective microorganisms (EM) and botanical formulations in vegetable production. The research consisted of two phases under a completely randomized design with three replicates. In the first phase, an inoculum was developed with strains of *Bacillus cereus*, *B. subtilis*, *Trichoderma longibrachiatum*, and *Serratia surfactantfaciens*, incorporated into a mixture of peanut shells and cow manure. The inoculated compost outperformed conventional compost in physicochemical and microbiological parameters, meeting the regulations for organic fertilizers and enhancing agricultural yield. In the second phase, phytosanitary control was evaluated in pepper (*Capsicum annuum*), cucumber (*Cucumis sativus*), and tomato (*Solanum lycopersicum*). Three treatments (T1: rue, neem, barbasco; T2: chili pepper, neem, oregano; T3: garlic, neem, basil) were applied at concentrations of 20% and 30%. Data were analyzed using Tukey's mean comparison test ($p < 0.05$). Identified pests included *Frankliniella* spp., *Aphis* spp., *Bemisia tabaci*, *Spodoptera* spp., and *Tetranychus urticae*. Treatments T2 and T3 stood out for their greater efficacy and productivity, especially in peppers and cucumbers. It was concluded that the effectiveness of bioinsecticides depends on the strategic selection of extracts according to the specific pest, the crop, and the concentration of the active ingredients.

Keywords: vegetables, inoculum, efficient microorganisms, pests, production.

Introducción

Los huertos familiares constituyen sistemas de producción en espacios reducidos que permiten obtener alimentos frescos mediante el uso de insumos locales y sin agroquímicos, lo que evita efectos negativos en la salud y el ambiente (Guerrero *et al.*, 2015). “Más allá de los recursos que brindan a los hogares, estos sistemas representan una apuesta por la soberanía alimentaria a través del autoabastecimiento. Esta práctica, respaldada por investigaciones como las de Cano (2015), permite que las familias accedan a productos frescos de forma constante. Al hacerlo, no solo fortalecen su propia seguridad alimentaria, sino que se alinean con la meta global de alcanzar un mundo con Hambre Cero, bajo el marco de los ODS”.

En Ecuador, especialmente en Manabí, los huertos familiares son una fuente importante de alimentos y un mecanismo de seguridad alimentaria local (Loor y Sabando, 2022). Sin embargo, la adopción de prácticas sostenibles como el compost y los insecticidas botánicos aún es limitada, pese al creciente reconocimiento de los impactos negativos de los agroquímicos sintéticos y el interés por alternativas ecológicas entre pequeños productores. En este contexto, la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí (ESPAM MFL) ha desarrollado investigaciones para obtener microorganismos eficientes autóctonos destinados a producir compost ecofuncional mediante la inoculación de microorganismos benéficos (Guzmán *et al.*, 2020; Intriago y Plaza, 2020; Zambrano Basurto, 2022).

La producción en huertos familiares está directamente vinculada con la salud y el bienestar, por lo que la dependencia de insumos químicos representa riesgos para los consumidores y los ecosistemas locales (Zapata *et al.*, 2024). Las hortalizas más comunes incluyen tomate, cebolla, pimiento y hierbas aromáticas, que son fáciles de cultivar y aportan nutrientes esenciales (Hernández *et al.*, 2021). Frente a ello, se vuelve prioritario promover alternativas sostenibles como abonos orgánicos e insecticidas botánicos que aumenten la productividad, mejoren la calidad del suelo y eviten la contaminación ambiental.

El compost aporta nutrientes esenciales y mejora las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo, fortaleciendo los ecosistemas (Delgado *et al.*, 2019). En cuanto al control de plagas, las plantas endémicas de Ecuador contienen metabolitos útiles como insecticidas, fungicidas y repelentes naturales, de acuerdo con lo reportado por Borja, (2021); y su extracción puede realizarse mediante infusión, decocción o maceración, dependiendo del tejido vegetal (Tigua Baque, 2024). En este marco, se propone sistematizar la información generada en la ESPAM MFL para evaluar el uso de diferentes tipos de compost e insecticidas botánicos en la producción de hortalizas en huertos familiares.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en dos fases principales. La Fase 1 evaluó el efecto de un compost inoculado con microorganismos eficientes autóctonos sobre la productividad de especies hortícolas en huertos familiares. El abono se produjo inicialmente en la Unidad de Docencia, Investigación y Vinculación del hato porcino de la ESPAM-MFL (sitio “El Limón”, 0°49'23.0"S 80°11'01.0"W), 15 m sobre el nivel del mar. Posteriormente, el huerto orgánico se implementó en la ciudad de Calceta (Av. San Lorenzo, coordenadas 0°50'49.0"S 80°10'18.7"W).

Mientras que la Fase 2 se centró en la elaboración y aplicación de bioinsecticidas botánicos para el control de plagas. Esta etapa se desarrolló íntegramente en el campus de la ESPAM-MFL, específicamente en el laboratorio de Biología Molecular y en el área del hato porcino (coordenadas 0°49'19.0"S 80°10'40.4"W). Cada fase incorporó procedimientos biológicos y agronómicos claramente definidos y desarrollados bajo condiciones controladas de manejo.

La Fase 1 consistió en la elaboración de un compost funcional a partir de cáscara de maní y estiércol bovino. Para la conformación de la pila, se establecieron tres capas sucesivas: primero, una base de dos sacos de cáscara de maní sin triturar; seguido de una segunda capa de tres sacos de estiércol bovino; y finalmente, una capa superior compuesta por tres sacos de cáscara de maní triturado. Se trabajó con dos pilas de 3 m³ siguiendo el sistema Indore, una inoculada con microorganismos eficientes y otra sin inocular. El biopreparado incluyó *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma longibrachiatum* y *Serratia surfactantfaciens*. La aplicación consistió en una dosis de 10 litros de biopreparado por cada pila de 3 m³.

Para su análisis, se emplearon equipos especializados como autoclaves, incubadoras y planchas de agitación, aplicando técnicas microbiológicas fundamentales entre las que destacan las diluciones seriadas, la tinción de Gram y el cultivo en medios nutritivos. Se controló humedad inicial, tiempos de inoculación y volteos, y se monitorearon temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica. La calidad del producto se evaluó mediante análisis de materia orgánica, nutrientes y microbiológicos, en el segundo y cuarto mes. La fitotoxicidad se determinó mediante ensayos de germinación con extractos del compost a los 60, 90 y 120 días.

Posteriormente, se estableció un huerto familiar empleando dos tratamientos: compost con microorganismos eficientes y compost sin inocular. Las unidades experimentales consistieron en camas de cultivo de 12 m de largo, 1,20 m de ancho y 0,20 m de profundidad. Tras la estandarización de las platabandas, se procedió a la siembra de las hortalizas mediante siembra directa o trasplante, de acuerdo con los requerimientos de cada especie. El manejo agronómico incluyó riego ajustado, fertilización con humus de lombriz, control ecológico de plagas mediante trampas cromáticas, aporque, tutorado, deshierba y cosecha manual. Se evaluaron variables de crecimiento y rendimiento en frutos, raíces y hojas mediante instrumentos calibrados (balanza, regla y vernier digital), siguiendo tamaños de muestra definidos por hilera.

La Fase 2 se desarrolló bajo un Diseño Completamente al Azar con tres réplicas, donde se evaluó el efecto de mezclas botánicas de bioinsecticidas. Los tratamientos consistieron en combinaciones de neem con especies aromáticas o de disponibilidad local, T1 (ruda, neem, barbasco), T2 (ají, neem, orégano) y T3 (ajo, neem, albahaca), con una relación equitativa (1:1:1) entre los tres componentes botánicos de cada tratamiento. Los materiales vegetales se lavaron, secaron y maceraron durante ocho días, con proporción materia seca/solvente (1:10); posteriormente, los extractos se filtraron y diluyeron entre 20 y 30 % según referencias técnicas. Las aplicaciones se realizaron semanalmente mediante bomba mochila de 20 L, alternando los biopreparados dentro de cada tratamiento.

El ensayo se estableció en un lote mecanizado en el que se elaboraron platabandas elevadas, donde se sembraron cultivos de pimiento (*Capsicum annuum*), pepino (*Cucumis sativus*) y tomate (*Solanum lycopersicum*). Se aplicó una capa uniforme de compost, riego por goteo, acolchado plástico y fertilización quincenal con bioestimulante orgánico compuesto por (citoquininas 210 ppm, auxinas 5,20 ppm y giberelinas 0,36

ppm, enriquecida con un complejo de 22 elementos que incluyen aminoácidos, extractos de algas, ácidos fúlvicos y micronutrientes quelatados), utilizando una dosis de 5 mL L⁻¹. La inoculación de microorganismos eficientes se efectuó cada 22 días. El manejo fitosanitario incluyó trampas cromáticas y aplicaciones botánicas según el tratamiento. Se registró la presencia de insectos plaga, el daño foliar y las variables productivas mediante procedimientos estandarizados, y la cosecha se realizó manualmente en estado comercial.

Resultados y discusiones

Producción del compost funcional

Temperatura °C

Las pilas de compostaje comenzaron a temperatura ambiente y, durante los primeros ocho días, ambas variantes (con y sin EM) mostraron un aumento térmico similar dentro del rango recomendado por la Norma Chilena Oficial (2004), lo que favorece la reducción de patógenos. Hacia el día 120, las dos pilas retornaron gradualmente a temperatura ambiente (ver Figura 1).

Este comportamiento concuerda con lo descrito por Acero y Díaz (2023), quienes señalan que el aumento inicial de temperatura se debe a la rápida degradación de materia orgánica y compuestos nitrogenados durante la fase termofílica. Los resultados confirman que ambas pilas siguieron un proceso de estabilización adecuado.

Humedad (%)

El proceso de compostaje inició con 55 y 53 % de humedad en T1 y T2, respectivamente. Durante 120 días, se mantuvo en un rango óptimo del 52 al 53 % en ambas pilas, alineándose con la NCh 2880 (2004) que establece el rango ideal entre 45 y 55 % para el compost maduro (ver Figura 2).

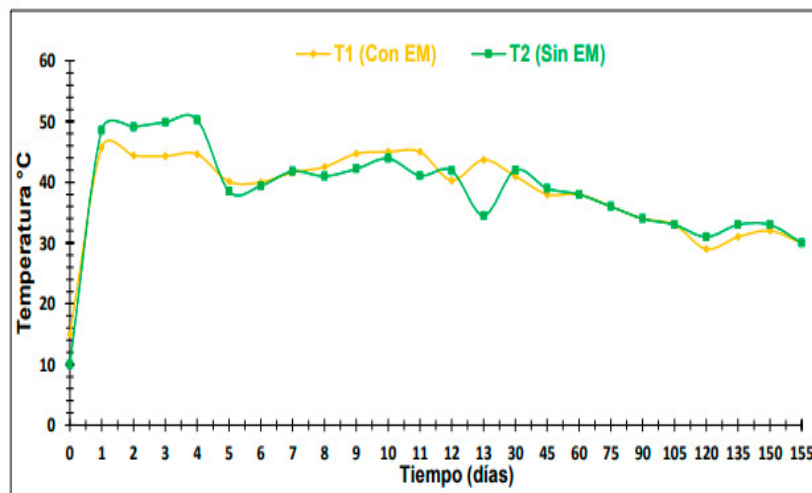


Figura 1. Temperatura durante el proceso de compostaje

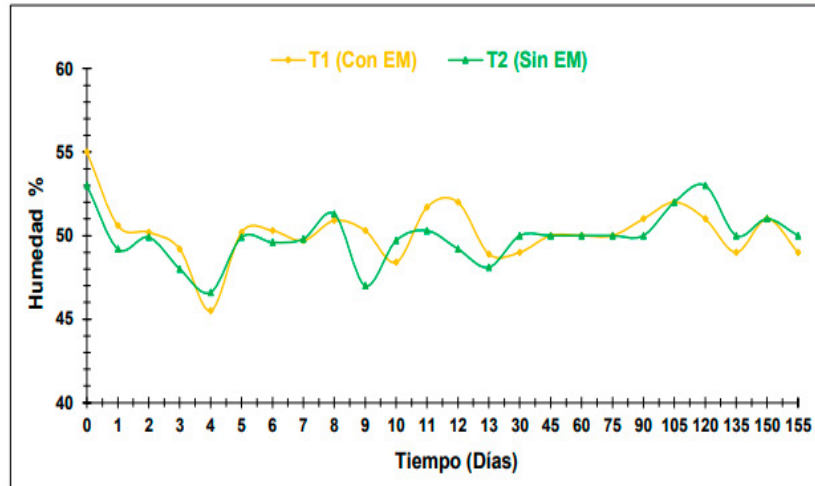


Figura 2. Variación de humedad durante el proceso de compostaje

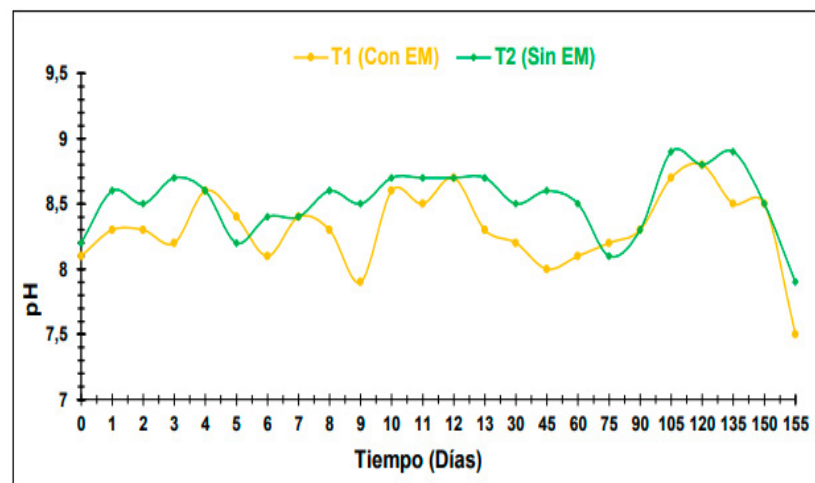


Figura 3. Variación de pH durante el proceso de compostaje

Potencial de hidrógeno (pH)

El pH inicial de las pilas, con y sin microorganismos eficaces (EM), presentó una tendencia ligeramente alcalina. Durante los 120 días de seguimiento, ambos tratamientos mantuvieron de forma consistente valores dentro del rango básico (ver Figura 3). Estos valores finales cumplen con los criterios establecidos por la Norma Técnica Colombiana (NTC, 2004) (pH 4,0–9,0) y la NCh 2880 (pH mínimo 7,5).

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Bárbaro *et al.* (2019), quienes observaron valores finales similares en procesos de compostaje. La coincidencia con la literatura y con las normas técnicas respalda la validez de los hallazgos y sugiere que ambos tratamientos favorecen la evolución adecuada del pH durante la descomposición.

Conductividad eléctrica (CE) (dS.m-1)

La conductividad eléctrica (CE) inició con valores cercanos entre tratamientos y se mantuvo en un rango estrecho durante todo el proceso, finalizando prácticamente igual a los 120 días,

lo que indica que los EM no alteraron de forma significativa la CE (ver Figura 4).

Estos resultados son coherentes con lo descrito por Bárbaro *et al.* (2019), quienes señalan que la CE puede variar ampliamente según el material y la dinámica del compostaje. La similitud entre tratamientos sugiere que los EM no modificaron la evolución de la CE, aportando evidencia sobre la estabilidad del proceso y su potencial para futuras evaluaciones.

Materia orgánica (%)

Los contenidos de materia orgánica (MO) aumentaron de forma constante en ambos tratamientos, superando los mínimos exigidos por la NCh 2880 (2004) y la Norma Mexicana (2018). Estos incrementos evidencian una adecuada estabilización del material y permiten considerar que el compost alcanzó un nivel de madurez y calidad satisfactorio (ver Tabla 1).

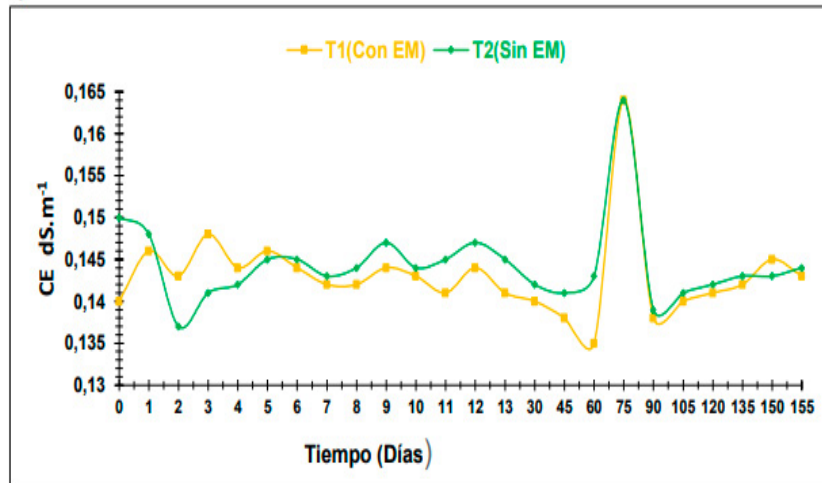


Figura 4. Variación de CE durante el proceso de compostaje

Al contrastar estos resultados con lo señalado por Guzmán (2021), quien indica que valores de MO mayores al 25 % clasifican al compost como Clase A, se confirma que ambos tratamientos produjeron un compost de alta calidad, respaldando la eficiencia del proceso y su utilidad potencial en aplicaciones agrícolas.

Tabla 1. Valores de materia orgánica en el compost con y sin EM

Tiempo de compostaje (Días)	T (Con EM)	T2 (Sin EM)
60	31,9	33,9
120	40,8	45,0

Macronutrientes (%)

A los 120 días, ambos tratamientos alcanzaron niveles adecuados de macronutrientes, aunque con ligeras variaciones entre ellos (ver Tabla 2). T1 presentó mayores contenidos de N y K, mientras que T2 mostró un valor superior de Ca. Estas diferencias evidencian el efecto de los EM sobre la mineralización y disponibilidad de nutrientes.

Los valores obtenidos cumplen con los criterios establecidos por la NCh 2880 (2004) para compost maduro, que exige $N \geq 0,80\%$ y $P \geq 0,1\%$ en base seca. De igual forma, los niveles de K se ajustan a lo recomendado por la NTC (2004), con valores superiores al 1,5 %. Esto confirma que ambos tratamientos lograron una adecuada madurez y calidad nutricional.

Micronutrientes (ppm)

A los 120 días, el contenido de micronutrientes—boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn)—mostró valores muy similares entre los tratamientos con y sin microorganismos eficaces (EM), manteniéndose en rangos cercanos (ver Tabla 3). Esta estabilidad sugiere que la incorporación de EM no generó efectos diferenciales sobre la disponibilidad de estos elementos en el compost.

En términos normativos, los niveles de Cu y Zn registrados se encontraron dentro de los límites permitidos por la NCh 2880 (2004), que establece máximos de 50 ppm para cobre y 60 ppm para zinc en compost destinado a uso agrícola. Este cumplimiento respalda la inocuidad del producto final y su potencial aplicación en sistemas de producción sostenible.

Tabla 2. Valores de macronutrientes en el compost con y sin EM

Elementos	Tiempo de compostaje (días)			
	T1 (con EM)		T2 (sin EM)	
	60	120	60	120
Nitrógeno % (N)	2,40	1,70	1,90	1,60
Fosforo % (P)	0,36	0,65	0,60	0,69
Potasio % (K)	0,48	2,21	1,93	2,16
Calcio % (Ca)	1,04	1,75	1,47	1,93
Magnesio % (Mg)	0,32	0,71	0,56	0,65

Tabla 3. Valores de micronutrientes en el compost con y sin EM

Elementos	Tiempo de compostaje (días)			
	T1 (con EM)		T2 (sin EM)	
	60	120	60	120
Boro ppm (B)	76	73	104	79
Zinc ppm (Zn)	58	93	89	92
Cobre ppm (Cu)	28	51	43	52
Hierro ppm (He)	908	989	955	967
Manganeso ppm (Mg)	141	225	183	230

Parámetros microbiológicos

El compostaje inoculado con EM (T1) presentó una reducción marcada de patógenos, evidenciándose la disminución de mesófilos aerobios, *Staphylococcus* L. y coliformes fecales. Estos resultados indican un proceso de higienización más eficiente (ver Tabla 4).

La eficacia del tratamiento T1 coincide con lo señalado en la literatura, donde la acción microbiana acelerada favorece la supresión de poblaciones indeseables durante el compostaje (Gama, 2025). En contraste, el compost sin inóculo (T2) mantuvo niveles elevados de contaminación (ver Tabla 4), lo que respalda la importancia del uso de consorcios microbianos para mejorar la calidad sanitaria del producto final.

Fitotoxicidad

El índice de germinación (IG) del rábano mostró diferencias claras entre tratamientos, con aumentos de 42 a 53 % en el compost con EM (T1) frente a 27 y 36 % en T2. Esto evidencia una menor fitotoxicidad cuando se usa inoculación microbiana. En conjunto, los resultados confirman que el EM favoreció la maduración del compost (ver figura 5).

El crecimiento radicular reveló una inhibición inicial marcada, pues valores de IG menores al 50 % indican alta fitotoxicidad (Zucconi *et al.*, 1981). Después de 120 días, el compost inoculado alcanzó niveles moderados dentro del rango de 50–80 %, descrito por Emino y Warman (2013). Esto sugiere una mayor estabilidad y calidad biológica del material.

Tabla 4. Concentración de patógenos (UFC.g⁻¹) en el compost durante el proceso del compostaje

Tratamientos	Tiempo (días)	Aerobios mesófilos	Coliformes fecales	<i>Staphylococcus</i>
T1 (Con EM)	60	96x10 ³	996x10 ²	1068x10 ³
	120	310x10 ²	323x10 ²	283x10 ³
T2 (Sin EM)	60	107x10 ⁴	243x10 ²	Negativo
	120	687x10 ⁴	291x10 ²	209x10 ³

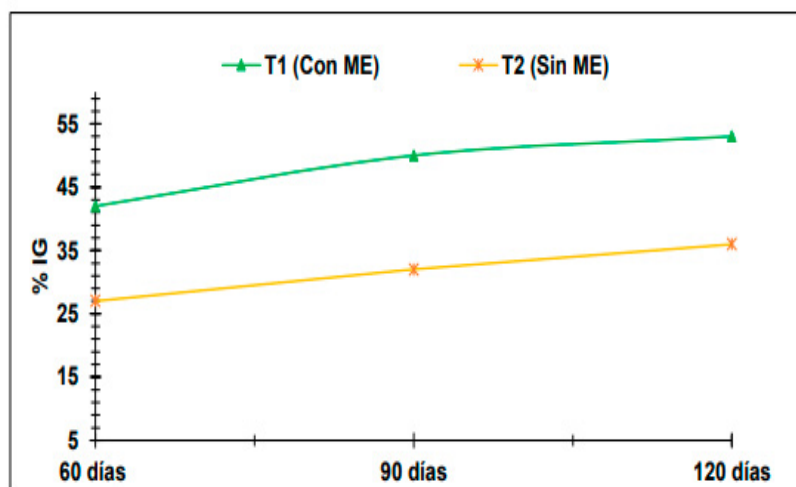


Figura 5. Índice de germinación del compost durante el proceso del compostaje

Huerto orgánico (variables morfológicas y productivas) Cultivos de hoja (cilantro, acelga, lechuga)

En cilantro (*Coriandrum sativum* L.) se identificaron diferencias significativas ($p < 0,05$), donde el compost con EM mostró la mejor respuesta. En lechuga (*Lactuca sativa* L.) y acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) no hubo diferencias estadísticas ($p > 0,05$), pero este tratamiento obtuvo los promedios más altos (ver Tabla 5).

Los hallazgos coinciden con estudios que resaltan el efecto de insumos orgánicos en hortalizas, como los 35 cm de hoja en acelga reportados por (Cañar, 2021). También se relacionan con los 21,03 cm de altura foliar y 122,5 g de peso de fruto descritos por Legua *et al.* (2021).

Cultivos de raíz (rábano)

Ambas variables respuesta del cultivo fueron significativamente influenciadas por el tipo de compost utilizado ($p < 0,05$). La platabanda con compost enriquecido con EM alcanzó la mejor categoría estadística, lo que evidencia un efecto positivo de este insumo en el desarrollo del cultivo (ver Tabla 6).

Estos resultados superan a los reportados por Zambrano Valdivieso (2021), quien obtuvo un diámetro de fruto de 2,74 cm en rábanos a los 30 días con fertilizantes orgánicos.

Esta diferencia sugiere que el uso de compost con EM puede potenciar el rendimiento del cultivo, respaldando la hipótesis de que los microorganismos benéficos mejoran la disponibilidad de nutrientes y favorecen el crecimiento.

Cultivos de frutos (pepino, pimiento, achojcha)

Las variables evaluadas en pepino (*Cucumis sativus* L.), pimiento (*Capsicum annuum* L.) y achojcha (*Cyclanthera pedata* (L.) Schrad.) mostraron una influencia significativa del compost con EM ($p < 0,05$), evidenciando diferencias estadísticas en la mayoría de los indicadores productivos. Solo el peso del fruto del pepino no presentó variación entre tratamientos, lo que sugiere una respuesta menos sensible a esta enmienda (ver Tabla 7).

Los hallazgos coinciden con lo reportado por Zambrano Valdivieso (2021), quien observó un diámetro de fruto similar en pepinos *C. sativus* tratados con *Bacillus* Cohn. De igual forma, Chila (2021) registró pesos de fruto comparables al usar compost orgánico, respaldando lo observado en este estudio. En conjunto, se infiere que el compost con EM mejora la productividad, excepto en el peso del fruto del pepino.

Tabla 5. Variables evaluadas en los cultivos de hoja sembrados en compost con y sin EM

Variantes/Variables	Cilantro		Acelga			Lechuga	
	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Longitud de raíz (cm)	Largo de hoja (cm)	Peso de hoja (g)	Altura de hoja (cm)	Peso de fruto (g)
Compost con EM	30,90 a	7,63 a	9,73 a	39,72 a	195,40 a	22,50 a	120,60 a
Compost sin EM	24,15 b	4,84 b	6,96 b	38,96 a	178,40 a	22,42 a	95,80 a
pHomVar	0,56	0,0253	0,8994	0,3296	0,6906	0,3586	0,0958
T estadístico	5,24	4,33	3,61	0,17	0,23	0,10	1,04
p-valor	0,0001	0,0008	0,002	0,8694	0,821	0,9213	0,329

Tabla 6. Variables evaluadas en el cultivo de rábano sembrado en compost con y sin EM

Variantes / Variables	Rábano	
	Diámetro de fruto (cm)	Peso de fruto (g)
Compost con EM	4,6 a	30,6 a
Compost sin EM	2,6 b	8,9 b
pHomVar	0,3806	4,28
T estadístico	9,04	0,0063
p-valor	<0,0001	0,0128

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 7. Variables evaluadas en los cultivos de frutos, en compost con y sin EM

Variantes/Variables	Pepino		Pimiento		Achojcha	
	Diámetro de fruto (mm)	Peso de fruto (g)	Diámetro de fruto (mm)	Peso de fruto (g)	Diámetro de fruto (mm)	Peso de fruto (g)
Compost con EM	6,74 a	615,80 a	6,34 a	101,40 a	4,52 a	55,20 a
Compost sin EM	5,92 b	679,60 a	5,46 b	66,20 b	3,58 b	36,20 b
pHomVar	0,9476	0,62	0,4896	3,05	>0,9999	0,7435
T estadístico	3,27	0,4889	3,25	0,028	3,44	4,00
p-valor	0,0114	0,5508	0,0117	0,0381	0,0089	0,0040

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Elaboración y uso de bioinsecticidas botánicos para el control de plagas en huertos familiares:

La evaluación de las plagas se realizó en tres momentos clave después del trasplante (DDT): a los 7, 30 y 60 días. El objetivo fue registrar el número de plantas afectadas por diferentes plagas en cada una de las especies estudiadas. Los datos recolectados se presentan en la siguiente sección.

Gusano soldado (*Spodoptera exigua*)

Los resultados muestran que las mezclas de bioinsecticidas mantuvieron bajas las poblaciones de gusano soldado en pimiento, pepino y tomate, con valores entre 1,0 y 2,0

individuos por planta. No hubo diferencias significativas en pimiento y tomate, mientras que en pepino el ajo-albahaca destacó solo al inicio. La consistencia general sugiere que el neem actuó como componente activo principal (ver Tabla 8).

Estos hallazgos coinciden con Isman (2020), quien atribuye a extractos como neem, ajo y ají efectos antialimentarios y reguladores del crecimiento. Asimismo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019) señala que los bioinsecticidas brindan control eficaz sin afectar salud o ambiente. En conjunto, respaldan a las mezclas botánicas como alternativa sostenible en huertos de pequeña escala.

Tabla 8. Número de gusano soldado en las plantas de pimiento, pepino y tomate en los diferentes momentos de evaluación

Mezcla de bioinsecticidas	Número de gusano soldado/planta		
	7 DDT	30 DDT	60 DDT
Pimiento			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,14 a	1,00 a	1,10 a
T2: Ají, neem, orégano	1,00 a	1,00 a	1,07 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,00 a	1,24 a	1,00 a
CV (%)	10,67	18,38	13,41
Pepino			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,52 b	1,52 a	1,62 a
T2: Ají, neem, orégano	1,41 ab	1,49 a	1,38 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,14 a	1,62 a	1,62 a
CV (%)	10,45	15,16	13,75
Tomate			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,27 a	1,10 a	1,27 a
T2: Ají, neem, orégano	1,00 a	1,30 a	1,14 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,00 a	1,00 a	1,14 a
CV (%)	10,23	8,00	16,35

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

DDT: días después del trasplante

Trips

En pimiento, T2 y T3 resultaron más efectivos a los 30 DDT que T1, registrando menos trips. En pepino, T3 mostró las poblaciones más bajas a 30 y 60 DDT. En tomate, T1 tuvo menos trips a los 30 DDT, mientras T2 y T3 alcanzaron los valores más altos, con variabilidad moderada (ver Tabla 9).

Estos patrones indican que la eficiencia de las mezclas depende del cultivo y del momento de evaluación, coincidiendo con estudios que resaltan el uso de extractos vegetales. Gupta *et al.* (2024) reportan mortalidades superiores al 80 % de *Thrips palmi* por acción de alcaloides, respaldando el potencial de compuestos botánicos y las tendencias observadas.

Pulgones

En general, todas las mezclas mostraron bajos y similares niveles de infestación, con una ligera ventaja de T1 en pimiento y tomate hacia los 30 días. En algunos casos, T2 y T3 alcanzaron valores comparables, y la variabilidad entre cultivos fue moderada, destacándose pepino por su respuesta más consistente (ver Tabla 10).

Estos resultados coinciden con lo señalado por Isman (2020) respecto a la eficacia del neem como bioinsecticida

de amplio espectro. Asimismo, la evidencia sobre mezclas botánicas indica posibles efectos sinérgicos por la acción repelente o tóxica de extractos como ajo, ají u orégano, lo que respalda el comportamiento observado en las combinaciones evaluadas (Phani *et al.*, 2021).

Araña roja

Las mezclas botánicas mostraron comportamientos diferenciados según el cultivo: en pimiento, T1 presentó la menor población de ácaros a los 7 días, y junto con T2 mantuvo la mayor eficacia a los 30 y 60 días; en pepino, las tres mezclas tuvieron efectos similares; en tomate, T1 y T2 fueron inicialmente más efectivos, mientras que T3 mostró menor respuesta inicial, pero alcanzó niveles comparables en evaluaciones posteriores (ver Tabla 11). En conjunto, los resultados confirman que las combinaciones basadas en *Azadirachta indica* con plantas bioactivas reducen eficazmente *Tetranychus urticae*, en concordancia con lo señalado por Pavela y Benelli (2016) sobre el efecto sinérgico de extractos vegetales.

Tabla 9. Plantas infestadas con trips en los diferentes momentos de evaluación

Mezcla de bioinsecticidas	Número de gusano trips/planta		
	7 DDT	30 DDT	60 DDT
Pimiento			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,14 a	1,52 b	1,27 a
T2: Ají, neem, orégano	1,00 a	1,14 a	1,14 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,27 a	1,14 a	1,27 a
CV (%)	13,88	14,26	15,75
Pepino			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,14 a	1,27 a	1,14 a
T2: Ají, neem, orégano	1,14 a	1,27 a	1,14 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,14 a	1,00 a	1,00 a
CV (%)	16,99	13,36	14,46
Tomate			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,24 a	1,27 a	1,24 a
T2: Ají, neem, orégano	1,00 a	1,41 a	1,20 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,00 a	1,41 a	1,14 a
CV (%)	18,38	8,18	10,00

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

DDT: días después del trasplante

Tabla 10. Plantas infestadas con pulgones en los diferentes momentos de evaluación

Mezcla de bioinsecticidas	Número de pulgones/planta		
	7 DDT	30 DDT	60 DDT
Pimiento			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,38 a	1,27 a	1,27 a
T2: Ají, neem, orégano	1,49 a	1,41 a	1,27 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,41 a	1,52 a	1,38 a
CV (%)	18,45	10,11	17,87
Pepino			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,62 a	1,24 a	1,41 a
T2: Ají, neem, orégano	1,73 a	1,14 a	1,27 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,72 a	1,41 a	1,41 a
CV (%)	5,17	18,04	8,18
Tomate			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,24 a	1,62 b	1,27 a
T2: Ají, neem, orégano	1,38 a	1,38 ab	1,14 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,62 a	1,14 a	1,14 a
CV (%)	19,59	16,17	16,35

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

DDT: días después del trasplante

Tabla 11. Plantas infestadas con araña roja en los diferentes momentos de evaluación

Mezcla de bioinsecticidas	Número de araña roja/planta		
	7 DDT	30 DDT	60 DDT
Pimiento			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,00 a	1,14 a	1,07 a
T2: Ají, neem, orégano	1,52 b	1,00 a	1,00 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,41 b	1,14 a	1,00 a
CV (%)	6,65	14,46	7,62
Pepino			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,38 a	1,27 a	1,00 a
T2: Ají, neem, orégano	1,41 a	1,27 a	1,00 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,27 a	1,00 a	1,10 a
CV (%)	15,17	13,36	11,44
Tomate			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,14 a	1,00 a	1,44 a
T2: Ají, neem, orégano	1,14 a	1,27 b	1,64 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,41 b	1,00 a	1,54 a
CV (%)	12,85	10,23	13,00

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

DDT: días después del trasplante

Mosca blanca

Los tratamientos mostraron respuestas variables según el cultivo. En pimiento y pepino, T2 fue el más efectivo inicialmente, y en pepino mantuvo, junto con T3, la menor población final (1,14 mosca/planta). En tomate, aunque T2 destacó a los 30 DDT, no conservó una ventaja clara al final. En general, pepino presentó la mejor respuesta, seguido de

pimiento, mientras que tomate mostró mayor variabilidad (ver Tabla 12).

Estos patrones coinciden con lo informado por Vélez *et al.* (2022), quienes evidencian la eficacia insecticida de extractos botánicos como ruda y neem contra *Bemisia tabaci*, apoyando que los tratamientos evaluados pueden brindar control efectivo según el cultivo y el momento de evaluación.

Tabla 12. Plantas infestadas con mosca blanca en los diferentes momentos de evaluación

Mezcla de bioinsecticidas	Número de mosca blanca/planta		
	7 DDT	30 DDT	60 DDT
Pimiento			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,27 b	1,14 a	1,27 a
T2: Ají, neem, orégano	1,00 a	1,14 a	1,27 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,41 b	1,14 a	1,14 a
CV (%)	9,09	16,99	15,75
Pepino			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,52 ab	1,52 b	1,14 a
T2: Ají, neem, orégano	1,27 a	1,41 ab	1,14 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,62 b	1,14 a	1,14 a
CV (%)	11,30	10,45	16,99
Tomate			
T1: Ruda, neem, barbasco	1,52 a	1,52 a	1,47 a
T2: Ají, neem, orégano	1,73 a	1,57 a	1,50 a
T3: Ajo, neem, albahaca	1,73 a	1,47 a	1,54 a
CV (%)	5,25	13,31	13,88

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

DDT: días después del trasplante

Tabla 13. Número de hojas afectadas en los cultivos en dos momentos de evaluación

Mezcla de bioinsecticidas	Número de hojas afectadas/planta	
	30 DDT	60 DDT
Pimiento		
T1: Ruda, neem, barbasco	4,10 b	3,53 a
T2: Ají, neem, orégano	2,79 a	2,49 a
T3: Ajo, neem, albahaca	2,58 a	3,71 a
CV (%)	12,01	17,55
Pepino		
T1: Ruda, neem, barbasco	4,10 b	3,53 a
T2: Ají, neem, orégano	2,79 a	2,49 a
T3: Ajo, neem, albahaca	2,58 a	3,71 a
CV (%)	7,32	13,05
Tomate		
T1: Ruda, neem, barbasco	2,52 a	4,37 a
T2: Ají, neem, orégano	3,62 b	4,13 a
T3: Ajo, neem, albahaca	3,37 ab	4,37 a
CV (%)	10,00	9,47

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

DDT: días después del trasplante

Número de hojas afectadas en los cultivos

El tratamiento T2 fue el más efectivo en general al presentar el menor número de hojas afectadas, aunque en pimiento a los 30 DDT no difirió de T3. En tomate, T1 mostró el menor daño foliar a los 30 DDT, siendo similar a T3 y superior a T2; a los 60 DDT no se observaron diferencias entre tratamientos (ver Tabla 13).

Estos hallazgos coinciden con Ortega (2025), quien resalta la eficacia de extractos botánicos con neem y otras plantas en el control de plagas, lo que sugiere que los biopreparados evaluados son opciones viables para reducir el daño foliar en pimiento y tomate.

Variables productivas en los cultivos

El cultivo de tomate no produjo frutos por la alta incidencia de plagas y la susceptibilidad del material vegetal, coincidiendo con lo señalado por Choez (2023) sobre la baja eficacia del

neem en esta especie. Para futuros huertos familiares, se sugiere la rotación con variedades de tomate nativas más resistentes o el refuerzo de los biopreparados con hongos entomopatógenos como *B. bassiana*. En contraste, pimiento y pepino respondieron favorablemente: el tratamiento T3 (ajo, neem y albahaca) obtuvo los mejores valores de diámetro y peso en pimiento, y el mayor rendimiento y calidad en pepino, superando ampliamente a T1 y T2 (ver Tabla 14).

Estos resultados sugieren que las mezclas botánicas contribuyen tanto al control de plagas como al crecimiento y rendimiento de los cultivos, lo cual coincide con Isman (2020) respecto a la reducción del estrés biótico y con Chowański *et al.* (2016) sobre el efecto repelente y promotor de los compuestos aromáticos. En conjunto, los hallazgos confirman que los bioinsecticidas constituyen una estrategia agroecológica viable y sostenible para huertos familiares.

Tabla 14. Variables productivas en los cultivos de pimiento y pepino

Mezcla de bioinsecticidas	Promedio de variables productivas			
	Nº de frutos/planta	Diámetro del fruto (mm)	Longitud del fruto (cm)	Peso del fruto (g)
Pimiento				
T1: Ruda, neem, barbasco	2,67 a	35,25 b	12,00 a	32,00 b
T2: Ají, neem, orégano	3,33 a	47,50 a	12,69 a	64,56 a
T3: Ajo, neem, albahaca	4,67 a	46,01 a	12,28 a	66,14 a
CV (%)	17,50	6,39	6,27	15,26
Pepino				
T1: Ruda, neem, barbasco	8,00 c	54,86 b	18,57 b	331,17 b
T2: Ají, neem, orégano	14,33 b	55,53 b	20,82 a	371,31 ab
T3: Ajo, neem, albahaca	23,00 a	59,42 a	21,40 a	419,80 a
CV (%)	9,53	5,32	3,15	12,47

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Conclusiones

Los parámetros químicos del compost se determinaron principalmente por las características de los residuos orgánicos utilizados como materia prima. La incorporación de inóculos mejoró los parámetros microbiológicos y redujo la fitotoxicidad del producto final. El compost elaborado con microorganismos favoreció el desarrollo vegetativo y productivo de las especies hortícolas. La dinámica de las plagas evidenció que la eficacia del control depende de la plaga específica, del cultivo afectado y de la concentración del ingrediente activo aplicado. Las mezclas de bioinsecticidas mostraron reducción de algunas plagas, destacándose los tratamientos conformados por ají, neem y orégano, así como por ajo, neem y albahaca, los cuales presentaron el mejor desempeño en el control de plagas y en las variables productivas, en los cultivos de pimiento y pepino.

Referencias bibliográficas

- Acero Trujillo, J. C. y Díaz Ramírez, L. C. (2023). *Propuesta de implementación del servicio de compostaje en la empresa Clementina Orgánicos en Guasca-Cundinamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. Ciencia Unisalle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/1cd25056-8db8-414b-95e1-40c97b6f9845/content>
- Bárbaro, L., Karlanian, M., Rizzo, P. y Riera, N. (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustrato. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 35(2), 126-136. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>

- Borja Yáñez, R. E. (2021). *Revisión bibliográfica de especies vegetales del Ecuador que son fuentes naturales de alcaloides y sus posibles usos* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/items/902055d7-e5e7-477a-8b7e-4e4f778fb2ce>]
- Cano Contreras, E. J. (2015). Huertos familiares: un camino hacia la soberanía alimentaria. *Revista Pueblos y Fronteras*, 10(20), 70–91. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-41152015000200070&lang=es
- Cañar Guevara Y. J. (2021). *Comportamiento agronómico del cultivo de acelga cultivar fordhook giant, con diferentes fertilizantes orgánicos en la granja experimental Santa Inés*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Machala] <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/17465>
- Chila Alcivar, J. G. (2021). *Evaluación del comportamiento agronómico del cultivo de pepino (Cucumis sativus L.) con la aplicación de tres compostajes orgánicos, Balzar-Guayas*. [Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/CHILA%20ALCIVAR%20JACINTO%20GABRIEL.pdf>
- Choez Vásquez, E. R. (2023). *Evaluación de tres alternativas ecológicas en el control del pulgón (Myzus persicae) del pimiento (Capsicum annuum)*. [Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador]. Repositorio Institucional de la UAE. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/CHOEZ%20V%20C3%81SQUEZ%20ERWIN%20REINALDO.pdf>
- Chowański, S., Adamski, Z., Marciniak, P., Rosiński, G., Büyükgüzel, E., Büyükgüzel, K., Falabella, P., Scrano, L., Ventrella, E., Lelario, F. y Bufo, S. (2016). A Review of Bioinsecticidal Activity of Solanaceae Alkaloids. *Toxins*, 8(3), 1–28. <http://doi.org/10.3390/toxins8030060>
- Delgado, M., Mendoza, K., González, M., Tadeo, J., y Martín, J. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 965–977. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Emino, E., y Warman, P. (2013). Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization*, 12 (4), 342–348. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1065657X.2004.10702203>
- Gama Gutiérrez, A. (2025). Influencia de microorganismos eficientes en la temperatura del proceso de compostaje de residuos orgánicos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(4), 5460–5472. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19168
- Guerrero, M., Estrella, N., Sangerman, D., Giménez, L., y Aguirre, L. (2015). Producción de alimentos en huertos familiares con camas biointensivas, en Españita, Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(spe11), 2139–2148. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-09342015000902139&lng=es&nrm=iso
- Gupta, S. K., Mandal, A., Ghosh, A., Kundu, A., Saha, S., Singh, A., y Dutta, A. (2024). Evaluating the insecticidal potential of alkaloids for the management of Thrips palmi: in vivo and in silico perspectives. *Scientific Reports*, 14, Article 28045. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77236-6>
- Guzmán Anaya, J. M. (2021). *Evaluación del compostaje de estiércol de caballo de un centro ecuestre en la región Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4921>
- Guzmán, A., Zambrano, D., Conforme, M. y Vera, B. (2020). Inóculo microbiano con capacidad celulolítica para la producción de compost en Manabí-Ecuador. *Revista Ciencias y Tecnologías*. 13(2), 39–45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7895142>
- Hernández, P., Ramírez, G., Vásquez, M., y Herrera, M. (2021). Patrones de consumo de frutas y hortalizas en la población urbana de Venezuela. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 25(2), 165–176. <https://scielo.isciii.es/pdf/renhyd/v25n2/2174-5145-renhyd-25-02-165.pdf>
- Intriago Quintana, J. A., y Plaza Avellan, I. E. (2020). Obtención de bacterias endófitas del tomatillo (*Lycopersicon pinpinellifolium* L.) como promotoras de crecimiento vegetal [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López]. Repositorio ESPAM MFL. <https://repositorio.esпам.edu.ec/bitstream/42000/1322/1/TT03D.pdf>
- Isman, M. B. (2020). Botanical insecticides in the twenty-first century—Fulfillment of the promise? *Annual Review of Entomology*, 65, 233–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>
- Legua, J. A., Caro, F., Nunja, J. V., y Cruz, D. D. (2021). Efecto de compost elaborado con subproductos de la caña de azúcar, para obtener mayor rendimiento en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional*, 6(8), 1–14. <https://dialnet.unirioja.es/metricas/documentos/ARTREV/8042616>
- Loor, M., y Sabando, K. (2022). Seguridad alimentaria en la comunidad rural Las Mercedes, Manabí-Ecuador. *QhaliKay Revista de Ciencias de La Salud*, 6(1), 88–94. <https://doi.org/10.33936/qkrcs.v6i1.3809>
- Norma Chilena Oficial (2004). *Compost - Clasificación y requisitos*. Instituto Nacional de Normalización (INN). https://miros.cl/wp-content/uploads/2020/01/NCh_2880_Compost_Clasificaci%C3%B3n.pdf
- Norma Mexicana (2018). *Métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales*. Secretaría de Medio Ambiente

- y Recursos Naturales (SEMARNAT). <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf>
- Norma Técnica Colombiana 5167 [NTC]. (2004). *Productos para la industria agrícola productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) - 5167 [NTC]. <https://goo.su/T0Hr7z>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/2120f787-5a49-41f5-a9fb-f4ceaac98b2c/content>
- Ortega Ortiz, S. J. (2025). *Efectos de extractos vegetales en el control de insectos que afectan al cultivo de pimiento (Capsicum annuum L) en la zona agrícola del cantón Milagro* [Tesis de Grado, Universidad Agraria del Ecuador] <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ORTEGA%20ORTIZ%20SERGIO%20JORDAN.pdf>
- Pavela, R., y Benelli, G. (2016). Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. *Trends in Plant Science*, 21(12), 1000–1016. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.10.005>
- Phani, V., Khan, M. y Dutta, T. (2021). Plant-parasitic nematodes as a potential threat to protected agriculture: Current status and management options. *Crop Protection*, 144, 105573. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105573>
- Tigua Baque, A. O. (2024). *Efectos del extracto botánico en el desarrollo y control del Lorito Verde (Empoasca krameni) en el cultivo de haba (Vicia faba)* [Tesis de Ingeniero Agropecuario, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/6282/1/Tigua%20Baque%20Angel%20Olegario.pdf>
- Vélez, M., Meza, R., Abasolo, F., y Álvarez, P. (2022). Uso de extractos botánicos para el control del pulgón (*Myzus persicae*: Aphididae) y mosca blanca (*Bemisia tabaci*: Aleyrodidae) en cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*: Solanaceae), en Ecuador. *Terra latinoamericana*, 40, 1-11. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1454>
- Zambrano Basurto, A. E. (2022). *Validación de bacterias endófitas solubilizadoras de fosfato como promotoras de crecimiento vegetal en plantas de tomate (Solanum lycopersicum)* [Tesis de Ingeniero Agrícola, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí- Manuel Félix López]. <https://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1876>
- Zambrano Valdivieso, L. J. (2021). *Efecto del Bacillus subtilis usado como protectante en el control de enfermedades en el cultivo de pepino (Cucumis sativus), la Troncal, Cañar*. [Tesis de Ingeniero agrónomo, Universidad Agraria del Ecuador]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ZAMBRANO%20VALDIVIEZO%20LEONARDO%20JAVIER.pdf>
- Zapata, B., Murillo, K., Frongillo, E., Corella, M., Renè, U., y Quizán, T. (2024). Los huertos familiares como estrategia de medios de vida en una comunidad costera: el caso de Bahía de Kino, Sonora. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 21(4), 472-489. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9740302>
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., y de Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle*, 22(4), 54-57. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571135650109373312>



Potencial agronómico y nutricional del maíz criollo en ensilaje para alimentación de rumiantes en el trópico húmedo

Agronomic and nutritional potential of creole maize in silage for ruminant feed in the humid tropics

Miguel Angel Macay Anchundia¹, Rodrigo Alberto Saquicela Rojas², Roxanna Patricia Palma³, Gabriela Liseth Zambrano Vera⁴

¹Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador

²Universidad Tecnológica Equinoccial

³Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador

⁴Unidad Educativa Municipal Hugo Cruz Andrade, Ecuador

Autor de correspondencia: miguel.macay@uleam.edu.ec

Recibido: 12/12/2025. Aceptado: 28/05/2026.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

Desde la revolución verde, se ha promovido el uso de variedades mejoradas y productos que ayuden a incrementar los rendimientos de los cultivos, obteniendo así muchos híbridos comerciales de diferentes cultivos, incluido entre ellos el maíz que es una de las principales materias primas a nivel mundial. Esta tendencia ha causado la disminución y en algunos casos la extinción de muchas semillas endémicas y/o criollas de las cuales se ha subestimado su potencial productivo y su capacidad de adaptación a las condiciones propias del sector. Tomando en cuenta este contexto y las tendencias actuales a recuperar este tipo de semillas tradicionales, se propone investigar el potencial de producción tanto de forraje fresco de maíz para ensilar, como de la calidad bromatológica y volúmenes de producción en kg·ha⁻¹. Se realizó un DBCA para la producción de forraje fresco y un DCA para el análisis de los componentes bromatológicos obteniendo resultados significativa y estadísticamente mayores para el maíz criollo en cuanto a producción de forraje verde (48.999,31 kg·ha⁻¹) y aporte de Extracto libre no nitrogenado en kg·ha⁻¹ alcanzando 23.470,67 kg·ha⁻¹ mientras que, para las demás variables, los resultados fueron similares estadísticamente para ambas variedades. Esto permite concluir que el uso de semillas nativas puede ser similar o incluso mejor que usando semillas híbridas con la ventaja adicional de que se puede obtener y conservar semilla de producción propia y no depender de casas comerciales, esto permite a futuro alcanzar la soberanía alimentaria.

Palabras clave: bovinos, bromatología, forraje, seguridad alimentaria, semillas nativas.

Abstract

Since the green revolution, the use of improved varieties and products that help increase crop yields has been promoted, thus obtaining many commercial hybrids of different crops, including corn, which is one of the main commodities worldwide. This trend has caused the decrease and in some cases the extinction of many endemic and/or native seeds whose productive potential and capacity to adapt to the conditions of the sector have been underestimated. Aware of this and of the current tendencies to recover this type of traditional seeds, it is proposed to investigate the production potential of fresh corn forage for silage, as well as the bromatological quality and production volumes in kg·ha⁻¹. A DBCA was performed for fresh forage production and a DCA for the analysis of bromatological components, obtaining significantly and statistically higher results for Criollo corn in terms of green forage production (48,999.31 kg·ha⁻¹) and contribution of non-nitrogenous elements in kg·ha⁻¹ reaching 23,470.67 kg·ha⁻¹ while, for the other variables, the results were statistically similar for both varieties. This allows us to conclude that the use of native seeds can be similar or even better than using hybrid seeds, with the additional advantage of being able to obtain and conserve seeds of our own production and not depend on commercial companies, which allows us to achieve food sovereignty in the future..

Keywords: cattle, bromatology, forage, food security, native seeds.

Introducción

El maíz (*Zea mays*) cuyo centro de origen se conoce como mexicano, es uno de los commodities más populares a nivel mundial debido a su consumo, nivel de producción y alto contenido nutricional nutraceutico, es especial las variedades criollas pigmentadas (Martínez Reyna, 2023). De este mismo estudio, se obtuvo que las diferentes variedades presentan características propias que las hacen mejor para obtener un producto en específico, como en el caso del maíz amarillo que se propone para alimentación animal y extracción de aceite.

Así mismo, presenta un gran potencial como cultivo en condiciones de trópico tomando en cuenta sus características de planta C_4 y su adaptabilidad a diversos nichos agroecológicos, tal como lo señalan Karnatam *et al.* (2023) y Zhao *et al.* (2022), además de su potencial productivo cuando se tecnifica apropiadamente haciendo un uso eficiente de sistemas de riego y potenciando la producción de este cultivo incluso en condiciones áridas o semi áridas (Zhang *et al.*, 2026).

En la actualidad, el uso de semillas nativas, criollas y endémicas está ganando terreno por diversas ventajas que presentan sobre los híbridos comerciales y por las tendencias de producción agroecológica que existen en la actualidad. Lima *et al.* (2022) hacen referencia de ello, al mencionar que este tipo de semillas promueve la agrobiodiversidad y la sostenibilidad familiar, alcanzando importancia tanto regional como local, al punto de no tratar únicamente estas semillas como un recurso más sino llegando incluso a realizar una caracterización etnobotánica y morfológica de la misma (Fuentes Figueroa *et al.*, 2022).

El maíz criollo amarillo se usa también en la preparación de alimentos típicos y tradicionales, esto incrementa la aceptación y necesidad de multiplicar este tipo de semillas para autoconsumo y mantener la autonomía familiar. Sin embargo, existen también productores que trabajan con cultivos asociados que prefieren no realizar algún tipo de selección o mejoramiento de sus semillas de maíz, contrario a los que trabajan con monocultivos que presentan mayor predisposición al mejoramiento (Cañas Correa, 2020).

Existe un potencial para desarrollar la cadena de valor del maíz destacando la producción de maíz para grano seco como materia prima en Ecuador acorde a lo mencionado por Analuisa *et al.* (2023) siendo de manera muy similar que en otros países del continente ya que presenta el mismo tipo de plagas y enfermedades como el cogollero (*Spodoptera frugiperda*), según lo manifestado por Cañas Correa (2020). Con esta consideración, es necesario mantener la calidad y diversidad de las semillas criollas tomando en cuenta aspectos físicos y fisiológicos como porcentaje de germinación, velocidad de emergencia, sanidad, entre otros y esto evaluarlo en diferentes épocas del año y condiciones edafoclimáticas (Lima *et al.*, 2022).

El maíz criollo amarillo se puede comercializar tanto en estado seco (maíz para grano o semilla), lechoso (choclo)

o incluso con la planta entera en estado semi lechoso (para forraje de rumiantes), lo que le da mucha más versatilidad si se lo compara con otros cultivos. En cuanto a su uso para repostería, existe una variedad de productos que se pueden obtener como bebidas y postres de los cuales las personas tienen mayor preferencia por alguna en particular siendo éstas, generalmente, muy nutritivas.

En cuanto a la comercialización del maíz seco, Cañas Correa (2020) menciona que los precios de venta, generalmente son designados por los intermediarios, la calidad del producto y el volumen de consumo nacional. Esta calidad, acorde Lima *et al.* (2022), puede verse afectada incluso por el tiempo de conservación, ya que semillas que no tienen buenas condiciones de almacenamiento pueden presentar problemas sanitarios y por ende de calidad de un año al siguiente.

El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2022), reportó que en Ecuador la producción de maíz llegó a 1,85 millones de toneladas en el año 2021 siendo la costa la región que tuvo mayor producción a nivel nacional, así mismo, tuvo la mayor cantidad de superficie sembrada donde Manabí y Los Ríos tuvieron mayor representación. De la mano con ello, los rendimientos por hectárea fluctúan alrededor de $5,72 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en dicho año con un crecimiento progresivo hasta $6,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ para el año 2025 siendo el destino principal su uso como ingrediente de insumos balanceados (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca - MAGP, 2025).

En la costa ecuatoriana, especialmente en la provincia de Manabí, se ha encontrado que un 63 % de los productores que producen maíz criollo, indistintamente de la variedad (amarillo fuego, amarillo arrugado, morado, etc.), guardan semillas de un año para el año siguiente y manejan distanciamientos de siembra de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ acorde a lo mencionado por Fuentes Figueroa *et al.* (2022); sin embargo, es necesario tener un cierto control de calidad para asegurar su permanencia.

La conservación de las semillas criollas debe ser aún sujeto de estudio, con el fin de encontrar técnica adecuadas de almacenamiento sin que éstas pierdan su calidad y poderlas utilizar en ciclos posteriores (Lima *et al.*, 2022). De igual forma, se debe desarrollar procesos de mejoramiento de cultivos que sean prácticos y sencillos de aplicar por los productores según lo recomendado por Fuentes Figueroa *et al.* (2022).

Existen compañías privadas que además de realizar mejoramiento en cultivos de maíz, también dan asesoría técnica a los productores promoviendo el uso de híbridos mejorados como lo mencionan Zambrano y Andrade Arias (2021), sin embargo, el producto final no puede ser utilizado como semilla para próximos ciclos productivos, mientras que con semillas criollas sí es factible hacerlo, además que suelen presentar ventajas adicionales como mayor aporte nutricional o mejor calidad del grano obtenido.

Tomando en cuenta estas consideraciones previas, y los beneficios de la suplementación con ensilaje de maíz según Atencio Solano *et al.* (2025), se plantea el analizar la

producción de forraje fresco y la cantidad de componentes bromatológicos (fibra cruda, proteína cruda, extracto etéreo, ceniza y extracto libre no nitrogenado) que produce un maíz híbrido comercial y un maíz amarillo criollo posterior a su uso en la elaboración de ensilaje.

Materiales y métodos

Preparación del terreno y siembra

El ensayo se desarrolló en las instalaciones de la Granja Experimental Río Suma, en El Carmen, Manabí (0°16'00"S de latitud y 79°26'00"O de longitud). En un inicio, se preparó el terreno y considerando que éste era plano, se trazó cada parcela de 3 m × 3,45 m, en forma de rectángulo. Así mismo, se realizó un control de malezas con chapeadora previo al establecimiento del cultivo. Posterior a ello, se tomó una muestra de suelo representativa para su análisis como propone Briceño Zabaleta (2023) y determinar las condiciones edáficas y requerimientos nutricionales.

Luego de ello, se plantaron siete parcelas por cada tratamiento y las semillas de ambas variedades con distanciamiento sugerido por Mestanza Uquillas *et al.* (2025) de 20 cm × 70 cm en la variedad híbrida y de 20 cm × 80 cm en la criolla; asimismo, en la variedad criolla se ubicaron dos semillas por hoyo y en la variedad híbrida, se ubicó una semilla por hoyo, siguiendo las recomendaciones de los productores y casa comercial respectivamente.

Manejo del cultivo

Durante el desarrollo del cultivo a los 15 y 45 días posteriores a la siembra, se aplicó urea a razón de 2 kg para cada variedad (híbrido y criollo) por aplicación. Además de una fertilización adicional de 10-30-10 al híbrido a los 60 días acorde a las recomendaciones de la casa comercial (Alba-Rojas *et al.*, 2023). Durante el desarrollo del cultivo se realizó control de malezas en dos ocasiones a toda el área del experimento con Glifosato y glufosinato de amonio para el control de malezas a razón de 100 ml por bomba de 20 litros en ambos casos.

Se cosechó la planta completa, excepto las raíces, a los 80 días posteriores a la siembra. En este momento se realizó la evaluación del grano encontrándolo medio lechoso o conocido también como línea media de leche, Souza *et al.* (2022); en estas condiciones se aprovecharían mejor los nutrientes contenidos en toda la planta para su uso como ensilaje.

Elaboración del ensilaje y evaluación del mismo

La planta de maíz cosechada se picó con una picadora artesanal móvil con motor de 5hp y cuchilla de desbrozadora, a un aproximado de 2 cm de tamaño de partícula y se llenó en bolsas plásticas negras para silo de calibre 6 con capacidad de 50 Kg (Mancipe-Muñoz *et al.*, 2022). Durante el llenado se procedió a la debida compactación e inoculación, en los volúmenes indicados en el producto, con 13,6 ml de Silobacter® (*Lactobacillus platarum*) por cada 50 kg de

forraje para ayudar al proceso de fermentación del silo que permaneció cerrado durante 40 días (Cedeño Moreira, 2022).

Posterior al llenado de las bolsas de ensilaje, se realizó el cálculo de los rendimientos del maíz para determinar los volúmenes de forraje por metro cuadrado extrapolando el peso total de forraje producido en cada parcela, dividido entre el área de la misma (m²) aplicando regla de tres (Solís Lucas y Castaño, 2022). Así mismo, las bolsas de ensilaje fueron almacenadas en un lugar fresco, seco y bajo cubierta como lo mencionan Muñoz Llor y Olmedo Rosado (2025) y 40 días después de elaborado el silo, se procedió a su apertura para tomar una muestra de 100 gramos y determinar mediante análisis de laboratorio su contenido de materia seca y contenido bromatológico (Palma *et al.*, 2026). Los resultados bromatológicos se obtuvieron en porcentaje y estos fueron extrapolados a producción en kg·ha⁻¹ tomando como referencia el rendimiento de las variedades de maíz en materia verde.

Análisis estadístico

Se realizó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) para el análisis de la producción de forraje por metro cuadrado y un Diseño Completamente al Azar (DCA) para el análisis bromatológico de las muestras con una prueba de Tukey al 5 % en el programa Infostat (Galindo-Domínguez, 2020).

Resultados

Materia verde

El análisis estadístico arrojó rendimientos para el maíz criollo de 48.999,31 kg·ha⁻¹ y para el híbrido 38.129,75 kg·ha⁻¹ (Tabla 1) siendo superior en producción el primero en cuanto a producción forrajera se refiere.

Tabla 1. Materia verde (kg·ha⁻¹) de maíz híbrido y criollo usados como forraje

Variedad	Medias (kg·ha ⁻¹)
Maíz Criollo	48.999,31 a
Maíz Híbrido	38.129,75 b
CV (%)	13,42
EE	2,21

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Análisis bromatológico

Proteína cruda (kg·ha⁻¹)

Para esta variable, los resultados obtenidos a través del análisis estadístico de los resultados bromatológicos, muestran que el porcentaje más alto lo obtuvo el maíz híbrido con 11,19 % y el maíz criollo alcanzó un 9,24 % (Tabla 2).

Tabla 2. Proteína cruda ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de maíz híbrido y criollo usados como forraje

Variedad	Proteína (%)	Medias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
Maíz criollo	9,24	4.527,53 a
Maíz híbrido	11,19	4.266,72 a
CV (%)	13,51	
EE	224,46	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Fibra cruda ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Respecto a los porcentajes de fibra cruda de cada tipo de maíz, se obtuvo diferencias significativas entre los tratamientos con un valor de 32,55 % para el criollo y 27,29 % para el híbrido. Mientras tanto, en la producción de fibra cruda por hectárea, los valores fueron más bien similares estadísticamente con cantidades de 13.371,91 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para el maíz criollo y 12.411,23 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para el maíz híbrido (Tabla 3).

Tabla 3. Fibra cruda ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de maíz híbrido y criollo usados como forraje

Variedad	Fibra Cruda (%)	Medias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
Maíz criollo	32,55	13.371,91 a
Maíz híbrido	27,29	12.411,23 a
CV (%)	13,50	
EE	657,67	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Extracto etéreo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Los porcentajes de extracto etéreo obtenidos para maíz híbrido y criollo fueron de 4,51 % y 3,16 % con valores de 1.719,65 y 1.548,38 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Tabla 4) respectivamente siendo estadísticamente similares acorde al análisis realizado.

Tabla 4. Extracto etéreo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de maíz híbrido y criollo usados como forraje

Variedad	Extracto etéreo (%)	Medias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
Maíz híbrido	4,51	1.719,65 a
Maíz criollo	3,16	1.548,38 a
CV (%)	13,62	
EE	84,09	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Ceniza ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

En el porcentaje de ceniza se encontraron diferencias significativas entre el contenido del maíz híbrido (8,42 %) y el maíz criollo (7,16 %), lo cual indica menor cantidad de minerales contenidos en este último; sin embargo, en cuanto a producción de ceniza por hectárea, no se presentaron

diferencias estadísticas con valores de 3.508,35 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y 3.210,52 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para maíz criollo e híbrido (Tabla 5) respectivamente.

Tabla 5. Ceniza ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de maíz híbrido y criollo usados como forraje

Variedad	Ceniza (%)	Medias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
Maíz criollo	7,16	3.508,35 a
Maíz híbrido	8,42	3.210,52 a
CV (%)	13,49	
EE	171,29	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Extracto libre no nitrogenado ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Los resultados obtenidos para esta variable fueron estadísticamente similares en cuanto a porcentajes alcanzando 48,25 % cada uno de los tratamientos dando como resultado también similitud estadística, por otro lado, al realizar la extrapolación a producción en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ se obtuvo valores de 23.470, 67 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para el maíz criollo y de 18.531,06 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para el maíz híbrido (Tabla 6) presentando diferencias estadísticas significativas destacando el primero como el mejor tratamiento.

Tabla 6. Extracto libre no nitrogenado ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de maíz híbrido y criollo usados como forraje

Variedad	Extracto libre no nitrogenado (%)	Medias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
Maíz criollo	48,25	23.470,67 a
Maíz híbrido	48,25	18.531,06 b
CV (%)	13,62	
EE	1.065,88	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Discusión**Materia verde**

Los resultados del maíz criollo se aproximan a los reportados por Zaragoza-Esparza *et al.* (2019) quienes realizaron una evaluación similar encontrando producciones desde 50.000 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Análisis bromatológico**Proteína cruda (%)**

Para esta variable, los valores fueron superiores a los reportados por Muñoz Loor y Olmedo Rosado, (2025) y por Jiang *et al.* (2022) quienes alcanzaron un máximo de 7,3 % y 8,05 % respectivamente. Sin embargo, cuando los porcentajes de Proteína cruda obtenidos se extrapolan a los rendimientos por hectárea, el maíz criollo sigue manteniéndose por encima

del híbrido, es decir, produce mayor cantidad de proteína cruda por unidad de área, aunque no presenta diferencias estadísticas con los resultados del maíz híbrido.

Fibra cruda (%)

Los valores de fibra cruda encontrados en esta investigación son menores a los reportados por Solís Lucas y Castaño (2022) quienes encontraron porcentajes de 31,80 % hasta 37,40 % de fibra cruda en ensilaje de maíz variando de acuerdo a la edad de corte del cultivo; sin embargo, son mayores a los reportados por Zhao *et al.* (2022) quienes alcanzaron un promedio de 23,97 % en el mismo parámetro. Estas diferencias con otros autores indican cómo los resultados pueden variar de acuerdo a las condiciones de ambientales y manejo del cultivo.

Extracto etéreo (%)

Los porcentajes de extracto etéreo encontrados fueron cercanos a los reportados por Solís Lucas y Castaño (2022) quienes mencionan porcentajes de 4,15 y 5,02 % para ensilaje de maíz cosechado a los 80 y 70 días respectivamente. Sin embargo, al extrapolar los rendimientos a una hectárea, los tratamientos no presentan diferencias significativas en su producción.

Ceniza (%)

Los porcentajes encontrados en esta investigación están por debajo de los reportados por Palma *et al.* (2026) quienes mencionan valores alrededor del 12 % de ceniza en ensilaje de pasto con adición de harina de maíz; por otro lado, son menores a los reportados por Zhao *et al.* (2022), quienes alcanzaron medias de 5,05 %. Estos resultados indicarían que los contenidos de minerales, tanto en maíz híbrido como criollo serían similares estadísticamente para este ensayo, pero pueden variar en otras condiciones de manejo.

Extracto libre no nitrogenado (%)

Laorodphan *et al.* (2026) detallan valores de 64,64 % mientras que Zhao *et al.* (2022) encontraron contenidos alrededor de 59,68 % de extracto libre no nitrogenado en ensilajes de maíz, siendo dichos valores mayores a los encontrados en la presente investigación, que podría verse influido por las variedades utilizadas en cada investigación o a la época del año en que se tomaron los datos acorde a lo reportado por Afonso *et al.* (2024) quienes muestran concentraciones diferentes de extracto libre no nitrogenado en los forrajes evaluados en los diferentes meses del año.

Conclusiones

El maíz criollo obtiene mayores rendimientos en cuanto a producción de forraje fresco alcanzando 48.999,31 kg·ha⁻¹.

Tomando en cuenta los resultados bromatológicos en cuanto a producción en kg·ha⁻¹ se concluye que el maíz criollo produce mayor cantidad de Extracto libre no nitrogenado alcanzando 23.470,67 kg·ha⁻¹ mientras que para los demás

componentes bromatológicos ambos tipos de maíz presentan resultados similares.

Referencias

- Afonso, P. R., Jolomba Silva, M. R., Cirilo Silva, B. E., Moras Cordeiro, J. M., & Morais, J. (2024). Caracterização produtiva e do valor nutritivo dos pastos implantados na fazenda 7 Quintas, Waco-Kungo, Angola. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 23(3), 367-380. <https://doi.org/10.5965/223811712332024367>
- Alba-Rojas, J. L., Alemán-Pérez, R. y Galeano-Montero, K. (2023). Respuesta a la fertilización química y orgánica de la variedad de maíz Tusilla en las condiciones de la Amazonía Ecuatoriana. *Revista De Ciencias Agropecuarias ALLPA*, 6(12), 2–11. <https://publicacionescd.uleam.edu.ec/index.php/allpa/article/view/663>
- Analuisa, I. A., Jimber del Río, J. A., Fernández Gallardo, J. A. y Vergara-Romero, A. (2023). La cadena de valor del maíz amarillo duro ecuatoriano. Retos y oportunidades. *Lecturas de Economía*, (98), 231-262. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n98a347315>
- Atencio Solano, L., Suarez Paternina, E., Tapia Coronado, J.J., Paternina Paternina, Y., Barragan Hernández, W. y Mestra Vargas, L. (2025). Efecto de la suplementación con ensilaje de maíz y yuca en el desempeño productivo y económico de ovinos criollos. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 17(2). <https://doi.org/10.18272/aci.vi.3748>
- Briceño Zabaleta, D. (2023). *Boletín técnico de muestreo de suelos* [Archivo PDF]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e3a4a596-95d2-48aa-9310-95d42abd1d32/content>
- Cañas Correa, N. (2020). Producción de 5.000 m² de maíz criollo amarillo duro (*Zea mays*) para comercialización en grano seco y canales de comercialización de banano bocadillo en el municipio de Landázuri Santander. [Tesis de grado, Universidad de La Salle] <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/801860e0-7200-4479-bb33-fb2867e602d1/content>
- Cedeño Moreira, A. A. (2022). Ensilaje con subproductos de plátano con aplicación de microorganismos lácticos [Tesis de grado, Universidad Laica Eloy Alfaro De Manabí]. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/5144>
- Fuentes Figueroa, T., Parrales Quimis, A. D., Morán Morán, J., García Cabrera, J. y Ortega, G. J. (2022). Caracterización morfológica y etnobotánica del maíz criollo (*Zea mays* L.) en la comuna Sancán, Ecuador: caracterización morfológica del maíz criollo (*Zea mays* L.). *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 6(2), 101–116. <https://doi.org/10.47230/unsum-ciencias>

- p6.n2.2022.631
-
- Galindo-Domínguez, H. (2020).
- Estadística para no estadísticos: una guía básica sobre la metodología cuantitativa de trabajos académicos*
- . 3Ciencias Editorial.
- <https://doi.org/10.17993/EcoOrgyCso.2020.59>
-
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022).
- Estadísticas agropecuarias (Estadístico Núm. 2021)*
- .
- <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
-
- Jiang, M., Ma, Y., Khan, N., Khan, M. Z., Akbar, A., Khan, R. U., Kamran, M. y Khan, N. A. (2022). Effect of spring maize genotypes on fermentation and nutritional value of whole plant maize silage in northern Pakistan.
- Fermentation*
- , 8(11), 587.
- <https://doi.org/10.3390/fermentation8110587>
-
- Karnatam, K. S., Mythri, B., Un Nisa, W., Sharma, H., Meena, T. K., Rana, P., Vikal, Y., Gowda, M., Dhillon, B. S. y Sandhu, S. (2023). Silage maize as a potent candidate for sustainable animal husbandry development - Perspectives and strategies for genetic enhancement.
- Frontiers in Genetics*
- , 14.
- <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1150132>
-
- Laorodphan, N., Poonpaiboonpipat, T., Incharoen, T., Foiklang, S., Cherdthong, A., Panase, P., Chaporton, N., y Intawicha, P. (2026). Effects of Replacing Corn Stover Silage with Sweet Sorghum Silage on Dry Matter Intake, Fibre Digestibility, and Milk Composition in Thai Holstein Crossbred Dairy Cows.
- Ruminants*
- , 6(2), 27.
- <https://doi.org/10.3390/ruminants6020027>
-
- Lima, L. S. de C. F., Fachini, C., Silva, V. R. da, Borges, J. R. P., y Forti, V. A. (2022). Maíz criollo del suroeste de São Paulo, Brasil: diversidad y calidad de semillas.
- Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*
- , 13(1), 15-28.
- <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2790>
-
- Mancipe-Muñoz, E. A., Castillo-Sierra, J., Vargas-Martínez, J. de J. y Avellaneda-Avellaneda, Y. (2022). Calidad composicional del ensilaje de tres cultivares de maíz (
- Zea mays*
-) del trópico alto colombiano.
- Agronomía Mesoamericana*
- , 33(2), 16.
- <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.46412>
-
- Martínez Reyna, P. (2023). Caracterización física, química, nutracéutica y propiedades tecnofuncionales de tres variedades de maíz (
- Zea mays*
-) criollo pigmentado (blanco, amarillo y negro). [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro]
- <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/4340>
-
- Mestanza Uquillas, C. A., Cedeño Cárcamo, P. J., Veliz, D. V., Vásquez Matute, S. C. y Pinargote Alava, J. J. (2025). Distanciamiento de siembra en
- Zea mays*
- L. durante la época seca y lluviosa en la costa central del Ecuador. LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida, 41(1), 151-161.
- <https://doi.org/10.17163/lgr.n41.2025.10>
-
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca - MAGP. (2025). Rendimientos de maíz amarillo duro 2025—Caracterización Producción. SIPA.
- <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/rendimientos-de-maiz-duro-2025-cp>
-
- Muñoz Llor, J. H., y Olmedo Rosado, D. A. O. (2025). Evaluación de la calidad bromatológica de dos tipos de ensilaje en el cantón Chone.
- Chone, Ciencia y Tecnología*
- , 3(2).
- <https://doi.org/10.56124/cct.v3i2.005>
-
- Palma, R., Zambrano Mendoza, M. E., Cedeño Espinoza, A. M., Pérez Zambonino, Y. A., y Balcázar Almeida, M. I. (2026). Calidad del Ensilaje de
- Megathyrus maximus*
- Enriquecido con Harina de Maíz e Inoculación Microbiana.
- Erevna Research Reports*
- , 4(1), 1.
-
- Solís Lucas, L. A. S., y Castaño, E. (2022). Efectos de los niveles de fertilización, distancias de siembra y momentos de corte sobre la calidad nutricional del ensilaje de maíz.
- Archivos de Zootecnia*
- , 71(273), 18-22.
- <https://doi.org/10.21071/az.v71i273.5606>
-
- Souza, A. M. de, Neumann, M., Rampim, L., Almeida, E. R. de, Matchula, A. F., Cristo, F. B., y Faria, M. V. (2022). Effect of storage time on the chemical composition of whole and grainless corn plant silage harvested at different maturity stages.
- Revista Brasileira de Zootecnia*
- , 51, e20200180.
- <https://doi.org/10.37496/rbz5120200180>
-
- Zambrano, C. E. y Andrade Arias, M. S. (2021). Productividad y precios de maíz duro pre y post Covid-19 en el Ecuador.
- Revista Universidad y Sociedad*
- , 13(4), 143–150.
- https://www.researchgate.net/publication/355928411_Productividad_y_precios_de_maiz_duro_pre_y_post_Covid-19_en_el_Ecuador
-
- Zaragoza-Esparza, J., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., López-López, C., García-Espinosa, J. C., Zamudio-González, B., Turrent Fernández, A. y Rosado-Núñez, F. (2019). Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz en Valles Altos de México: Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz.
- Revista mexicana de ciencias agrícolas*
- , 10(1), 101–111.
- <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1403>
-
- Zhang, P., Chang, J., Xiao, L., Shi, Y., Harrison, M. T., Zhao, M., Feng, Y., Zhao, H., Wang, C., Shen, H., Luo, Z., Shi, Z., y Fang, J. (2026). Shifts in sowing dates and water management promote high and stable potential yield of silage maize in China: Implications for quality feed intensification.
- Field Crops Research*
- , 341, 110433.
- <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2026.110433>

Zhao, M., Feng, Y., Shi, Y., Shen, H., Hu, H., Luo, Y., Xu, L., Kang, J., Xing, A., Wang, S., y Fang, J. (2022). Yield and quality properties of silage maize and their influencing factors in China. *Science China Life Sciences*, 65(8), 1655-1666. <https://doi.org/10.1007/s11427-020-2023-3>



Forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays*) como alimentación de terneros: una revisión actualizada

Hydroponic green corn (*Zea mays*) fodder for feeding calves: an updated review

Janpier Saul Campozano Parrales¹, Marco Antonio Alcívar Martínez

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”, Ecuador

Autor de correspondencia: marco.alcivar@espam.edu.ec

Recibido: 21/10/2025. Aceptado: 12/06/2025.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

El forraje verde hidropónico (FVH) de maíz se ha planteado como una alternativa alimenticia de interés para terneros y bovinos jóvenes, sobre todo en sistemas donde la disponibilidad de forraje cambia por estacionalidad, costos de alimentación o limitaciones de tierra y agua. El objetivo de esta revisión fue sintetizar, de manera cualitativa, la evidencia publicada entre 2015 y 2025 sobre el uso de FVH de maíz en la alimentación de terneros, considerando variables nutricionales, productivas, metabólicas, económicas y de sostenibilidad. Se empleó una revisión narrativa estructurada con elementos adaptados de PRISMA 2020. La búsqueda consideró bases académicas como Scopus, PubMed, Web of Science y Google Scholar, además de registros complementarios identificados durante la depuración bibliográfica. Se priorizaron estudios experimentales y revisiones relacionadas con FVH de maíz en terneros, búfalos jóvenes, bovinos jóvenes o terneras, excluyendo literatura gris y documentos sin relación directa con la temática. Los resultados muestran que el FVH de maíz puede mejorar la digestibilidad, el aprovechamiento de nutrientes, la ganancia de peso y la eficiencia alimenticia cuando se usa como sustituto parcial de concentrados o forrajes convencionales. También se identifican aportes en parámetros ruminales, metabolitos sanguíneos y costos de alimentación. Sin embargo, la evidencia sigue siendo heterogénea y limitada en evaluaciones ambientales y de largo plazo. Se concluye que el FVH de maíz es una alternativa prometedora, pero requiere mayor estandarización experimental y análisis integrales para recomendar su adopción en sistemas ganaderos de pequeña escala.

Palabras clave: nutrición de terneros, forraje hidropónico, digestibilidad, ganancia de peso, sostenibilidad.

Abstract

Hydroponic green maize fodder (HMF) has been proposed as a relevant feeding alternative for calves and young cattle, especially in systems where fodder availability is affected by seasonality, feeding costs, or land and water limitations. The aim of this review was to qualitatively synthesize evidence published between 2015 and 2025 on the use of hydroponic maize fodder in calf feeding, considering nutritional, productive, metabolic, economic, and sustainability-related variables. A structured narrative review was conducted using elements adapted from PRISMA 2020. The search considered academic databases such as Scopus, PubMed, Web of Science, and Google Scholar, together with complementary records identified during bibliographic screening. Experimental studies and reviews related to hydroponic maize fodder in calves, buffalo calves, young cattle, or heifers were prioritized, while gray literature and documents without direct relevance to the topic were excluded. The evidence suggests that hydroponic maize fodder may improve digestibility, nutrient utilization, weight gain, and feed efficiency when used as a partial substitute for concentrates or conventional forages. Contributions related to rumen parameters, blood metabolites, and feeding costs were also identified. However, the evidence remains heterogeneous and limited regarding environmental and long-term assessments. It is concluded that hydroponic maize fodder is a promising alternative, but further experimental standardization and integrated analysis are needed before recommending its adoption in smallholder livestock systems.

Keywords: calf nutrition, hydroponic fodder, digestibility, weight gain, sustainability.

Introducción

La producción pecuaria cumple un papel clave en la seguridad alimentaria, no solo porque aporta carne, leche y huevos, sino porque estos alimentos concentran proteína de alta calidad, aminoácidos esenciales y micronutrientes que no siempre se cubren con facilidad desde dietas basadas únicamente en vegetales. En términos prácticos, los alimentos de origen animal contribuyen al crecimiento, al desarrollo cognitivo y al mantenimiento de funciones fisiológicas básicas, sobre todo en niños, mujeres en edad reproductiva, personas mayores y poblaciones con dietas limitadas. Rueda García *et al.* (2024) destacan que la calidad nutricional de los alimentos terrestres de origen animal varía según especie y sistema productivo, pero mantiene una contribución importante en proteína y micronutrientes como vitamina B12, hierro y zinc. En la misma línea, Leroy *et al.* (2022) y Alders (2025) recuerdan que los sistemas pecuarios deben analizarse dentro de dietas saludables, sostenibles y culturalmente contextualizadas, evitando miradas simplistas que reduzcan la discusión solo a producción o emisiones.

Ahora bien, producir alimentos de origen animal también exige enfrentar varios desafíos. El cambio climático viene modificando la disponibilidad de agua, la calidad de las pasturas y la estabilidad de los sistemas de alimentación animal. Weindl *et al.* (2015) explican que los sistemas pecuarios deben adaptarse a escenarios climáticos cambiantes, porque la disponibilidad de forraje y la productividad pueden verse afectadas de forma directa. A ello se suma el efecto del estrés térmico sobre el desempeño productivo y reproductivo del ganado, señalado por Kebede (2016), así como la presión económica que puede generar el clima sobre sistemas mixtos agrícolas y pecuarios, analizada por Thamo *et al.* (2017). Runting *et al.* (2024) añaden que mantener esquemas productivos tradicionales sin ajustes técnicos puede acelerar la degradación de tierras y afectar la rentabilidad. Por eso, más que hablar de una sola solución, resulta necesario buscar alternativas alimenticias que sean eficientes, accesibles y sostenibles, especialmente para pequeños y medianos productores.

En este escenario aparece el forraje verde hidropónico (FVH), una tecnología que permite producir biomasa vegetal sin suelo, en espacios reducidos y con ciclos cortos. En el caso del maíz (*Zea mays*), el FVH puede obtenerse en pocos días y ofrecer un material fresco, palatable y con potencial nutricional para rumiantes jóvenes. Su interés aumenta cuando el productor enfrenta escasez de forraje, sequías, altos costos de concentrados o limitaciones de tierra. Además, desde una perspectiva de sostenibilidad, la producción controlada de forraje puede ayudar a reducir la dependencia de pasturas estacionales y a mejorar la disponibilidad de alimento durante el año. No obstante, su adopción no debe idealizarse: requiere inversión inicial, manejo higiénico, control de humedad, buena calidad de semilla y conocimiento técnico para evitar

pérdidas por hongos o variabilidad nutricional.

Los estudios recientes sobre FVH de maíz en terneros y bovinos jóvenes muestran resultados alentadores. Rajkumar *et al.* (2018) reportaron mejoras en consumo de materia seca, ganancia de peso, eficiencia alimenticia y costo por kilogramo de ganancia cuando el FVH se usó como sustituto parcial del alimento iniciador. Dadhich *et al.* (2019, 2020, 2021) abordaron su efecto sobre utilización de nutrientes, parámetros ruminales y economía de alimentación en terneros Rathí. Arif *et al.* (2023) evaluaron crecimiento, balance de nitrógeno, digestibilidad, hematología y metabolitos sanguíneos en terneros búfalos. Más recientemente, Benu *et al.* (2024) analizaron el reemplazo de ensilaje de pasto por FVH de maíz en terneros destetados Ongole x Brahman, mientras que Joshi *et al.* (2024) estudiaron el FVH de maíz con y sin probiótico en terneros Gir. En conjunto, estos trabajos permiten mirar el tema con optimismo, pero también muestran que la evidencia está dispersa y no siempre integra nutrición, desempeño productivo, salud, costos y sostenibilidad en una sola lectura.

Por esa razón, esta revisión busca analizar de forma crítica el potencial del FVH de maíz como alternativa nutricional y sostenible para la alimentación de terneros. El propósito no es presentarlo como una solución universal, sino ordenar la evidencia disponible, identificar beneficios, reconocer limitaciones y mostrar las brechas que todavía deben resolverse para generar recomendaciones útiles en sistemas ganaderos de pequeña escala y en contextos donde el acceso constante a forraje de calidad representa una dificultad recurrente.

Materiales y métodos

El estudio corresponde a una revisión narrativa estructurada, con apoyo de elementos metodológicos adaptados de la declaración PRISMA 2020. Se eligió este enfoque porque permite organizar la literatura disponible sin perder la posibilidad de discutir los resultados de manera interpretativa. En otras palabras, no se trató únicamente de reunir artículos, sino de revisar qué aporta cada fuente al análisis nutricional, productivo, económico y ambiental del FVH de maíz en terneros.

La búsqueda bibliográfica se orientó a publicaciones del periodo 2015-2025. Se consideraron bases como Scopus, PubMed, Web of Science y Google Scholar, así como documentos localizados a partir de búsquedas complementarias por título exacto. Los términos usados combinaron expresiones en inglés y español relacionadas con hydroponic maize fodder, hydroponic corn fodder, forraje verde hidropónico, terneros, calves, buffalo calves, young cattle, digestibility, growth performance, nitrogen balance, rumen parameters, blood metabolites, economics y sustainability. A partir de este proceso se identificaron 328 registros; luego de eliminar 55 duplicados quedaron 273 registros para cribado. Tras la revisión de títulos y resúmenes se excluyeron 215 registros, por lo que 58 textos pasaron a

evaluación de elegibilidad. Finalmente, se seleccionaron 8 estudios directamente relacionados con FVH de maíz en terneros, búfalos jóvenes, bovinos jóvenes o terneras para la síntesis cualitativa.

El flujo de identificación, depuración, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios se presenta en la Figura 1.

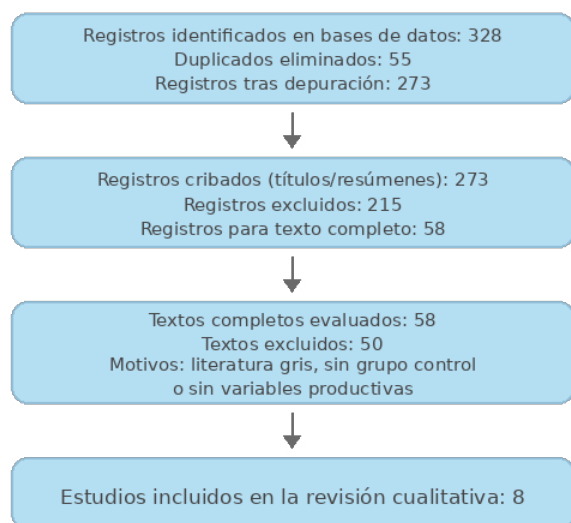


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de búsqueda y selección de estudios según PRISMA

Las cadenas de búsqueda empleadas en las bases de datos y su propósito metodológico se presentan en la Tabla 1.

Los criterios de inclusión priorizaron estudios revisados por pares, publicados entre 2015 y 2025, con acceso al texto completo o a información bibliográfica suficiente para verificar sus variables principales, que evaluaran FVH de maíz o forraje hidropónico de maíz en terneros, búfalos jóvenes, bovinos jóvenes o terneras. Los estudios incluidos debían reportar variables como consumo, digestibilidad, ganancia de peso, conversión alimenticia, balance de nitrógeno, parámetros ruminales, metabolitos sanguíneos, costos de alimentación o sostenibilidad. Se excluyeron estudios centrados únicamente en cabras, ovejas, aves, conejos o cebada hidropónica, salvo cuando aportaban contexto comparativo. También se excluyeron documentos sin metodología clara, literatura gris o referencias que no respaldaban directamente las afirmaciones del manuscrito.

Los criterios de inclusión y exclusión aplicados durante la depuración bibliográfica se detallan en la Tabla 2.

Tabla 1. Cadenas de búsqueda utilizadas para la revisión bibliográfica

Base de datos	Cadena de búsqueda	Propósito
Scopus / Web of Science	("hydroponic maize fodder" OR "hydroponic corn fodder") AND (calves OR "young cattle")	Identificar estudios experimentales sobre FVH de maíz en terneros o bovinos jóvenes.
PubMed / Google Scholar	("hydroponic maize fodder") AND (digestibility OR "nitrogen balance" OR "blood metabolites")	Localizar estudios sobre metabolismo, digestibilidad y salud animal.
Google Scholar / repositorios de revistas	("forraje verde hidropónico") AND (terneros OR "bovinos jóvenes")	Incorporar literatura regional y estudios publicados en revistas no siempre capturadas por una sola base.
Scopus AI / búsqueda por título	Arif 2023; Rajkumar 2018; Benu 2024; Joshi 2024; Dadhich 2019-2021	Verificar estudios directamente relacionados con FVH de maíz y terneros o bovinos jóvenes.

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la revisión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos revisados por pares entre 2015 y 2025.	Tesis no publicadas, informes institucionales sin arbitraje o literatura gris.
Estudios sobre FVH de maíz en terneros, búfalos jóvenes, bovinos jóvenes o terneras.	Estudios enfocados solo en cabras, ovejas, aves o conejos.
Investigaciones con variables nutricionales, productivas, ruminales, sanguíneas, económicas o ambientales.	Publicaciones sin variables relacionadas con alimentación animal o desempeño productivo.
Estudios experimentales, revisiones o artículos con metodología explícita.	Opiniones, cartas al editor o documentos sin diseño metodológico verificable.
Fuentes con datos bibliográficos suficientes para citación académica.	Referencias incompletas o no verificables mediante datos bibliográficos suficientes.

Manejo y síntesis de la información

La información se organizó en una matriz bibliográfica que consideró autor, año, especie o categoría animal, tratamiento, variables evaluadas y principales resultados. Cuando una fuente reportó datos numéricos verificables en el resumen, en el texto completo o en la página de la revista, estos se incorporaron de manera concreta. Cuando la fuente aportó evidencia temática, pero no datos numéricos comparables, se utilizó únicamente para interpretación cualitativa. Esta decisión evitó atribuir porcentajes, valores o efectos productivos no comprobados en la fuente primaria.

Resultados

Caracterización general de la evidencia

La evidencia revisada confirma que el FVH de maíz ha sido estudiado principalmente como sustituto parcial de concentrados, alimento iniciador o forrajes convencionales. La mayoría de trabajos se concentra en terneros, terneros búfalos o bovinos jóvenes, con periodos experimentales relativamente cortos y diseños orientados a medir consumo, digestibilidad, crecimiento, conversión alimenticia o indicadores metabólicos. Este punto es importante porque el FVH no aparece como alimento único, sino como complemento o reemplazo parcial dentro de dietas formuladas.

En terneros cruzados, Rajkumar *et al.* (2018) evaluaron el uso de forraje de maíz producido por hidroponía como sustituto parcial del alimento iniciador. El estudio trabajó con 18 terneros destetados distribuidos en tres tratamientos y reportó diferencias significativas en consumo de materia seca, ganancia total de peso, ganancia diaria promedio y conversión alimenticia. Además, el costo por kilogramo de ganancia fue menor en el tratamiento con mayor sustitución, lo que sugiere un aporte productivo y económico cuando el FVH se maneja adecuadamente.

En terneros búfalos, Arif *et al.* (2023) evaluaron tres dietas: una dieta basal, una dieta basal con 20 % de harina de forraje hidropónico de maíz y otra con 40 %. El ensayo se realizó durante 100 días con 12 terneros búfalos de 8 a 10 meses de edad. Los autores analizaron crecimiento, balance de nitrógeno, digestibilidad, hematología y metabolitos sanguíneos, lo que convierte este trabajo en una de las fuentes más completas para discutir el efecto del FVH de maíz más allá del peso corporal.

Benu *et al.* (2024) aportan evidencia reciente en terneros destetados Ongole x Brahman al analizar el reemplazo de ensilaje de pasto por FVH de maíz. Este trabajo es útil porque no se limita a crecimiento, sino que considera consumo, digestibilidad, parámetros ruminales y metabolitos sanguíneos. En términos prácticos, ayuda a entender cómo responde el animal cuando el FVH reemplaza una fuente forrajera convencional y no solo una fracción del concentrado.

Digestibilidad y aprovechamiento de nutrientes

Los estudios orientados a digestibilidad coinciden en que el FVH de maíz puede favorecer el aprovechamiento de nutrientes cuando se incorpora de forma parcial y balanceada. Rajkumar *et al.* (2018) no observaron diferencias significativas en digestibilidad entre tratamientos, aunque sí reportaron mejoras productivas y económicas. En cambio, Dadhich *et al.* (2019) analizaron la eficiencia de utilización de nutrientes en terneros Rathi, mientras que Arif *et al.* (2023) incluyeron mediciones de digestibilidad y balance de nitrógeno en terneros búfalos. Estas diferencias muestran que el efecto del FVH puede depender del nivel de inclusión, la forma de presentación, la dieta base y la categoría animal.

Desde una lectura técnica, el FVH de maíz puede ser valioso por su palatabilidad y por el cambio nutricional que ocurre durante la germinación. Sin embargo, su alto contenido de humedad obliga a interpretar los resultados siempre en base de materia seca. Este punto debe manejarse con cuidado porque comparar FVH fresco con concentrados o forrajes secos puede llevar a conclusiones equivocadas si no se estandarizan las unidades de análisis.

Crecimiento y eficiencia alimenticia

El desempeño productivo es una de las dimensiones más reportadas. Rajkumar *et al.* (2018) encontraron mejores valores de ganancia diaria y conversión alimenticia en terneros alimentados con FVH como sustituto parcial del alimento iniciador. Joshi *et al.* (2024), en terneros Gir, reportaron que el uso de FVH de maíz, especialmente combinado con *Saccharomyces cerevisiae*, tuvo efectos significativos sobre peso corporal, ganancia diaria promedio y conversión alimenticia. Según estos autores, la mejor respuesta se observó cuando el 75 % de la proteína del concentrado fue reemplazada por FVH de maíz con probiótico.

Estos resultados son útiles para sistemas de crianza porque la ganancia de peso temprana influye en el desarrollo posterior del animal. Aun así, conviene evitar generalizaciones rápidas: una mejora en un tratamiento no significa que todos los niveles de reemplazo sean adecuados. La respuesta depende de la calidad del FVH, la dieta total, la edad del ternero, el manejo sanitario y la disponibilidad real de materia seca.

Parámetros ruminales, sanguíneos y seguridad metabólica

El análisis de parámetros ruminales y sanguíneos permite mirar si el FVH solo mejora el consumo o si también influye en la fisiología digestiva y metabólica. Dadhich *et al.* (2020) estudiaron parámetros ruminales en terneros Rathi, mientras que Arif *et al.* (2023) evaluaron hematología y metabolitos sanguíneos en terneros búfalos. Benu *et al.* (2024) también incorporaron parámetros ruminales y metabolitos sanguíneos en terneros destetados. En conjunto, estas fuentes permiten sostener que el FVH de maíz puede analizarse como una

estrategia alimenticia con efectos sobre fermentación ruminal y estado metabólico, no únicamente como una fuente de volumen o fibra.

Sin embargo, se requiere prudencia al interpretar seguridad metabólica. Los resultados disponibles apuntan a que el FVH de maíz puede utilizarse sin efectos adversos evidentes cuando se maneja como sustituto parcial, pero los estudios suelen tener tamaños muestrales pequeños y periodos cortos. Por ello, todavía hacen falta trabajos que evalúen salud, reproducción, crecimiento posterior y desempeño productivo a largo plazo.

Economía y sostenibilidad

La dimensión económica es clave para pequeños productores. Rajkumar *et al.* (2018) reportaron reducción del costo por kilogramo de ganancia en el tratamiento con FVH. Dadhich *et al.* (2021) abordaron específicamente la economía de alimentar terneros Rathí con FVH de maíz, lo que resulta relevante para discutir la viabilidad del sistema en finca. Castillo *et al.* (2023) también evaluaron el FVH de maíz como sustituto de

concentrados en terneros búfalos, aportando evidencia para analizar su uso en dietas donde los concentrados encarecen la alimentación.

En sostenibilidad, la idea central es que el FVH puede producirse con menos superficie y con mayor control sobre el uso de agua, aunque esta ventaja debe demostrarse en cada contexto. Ertl *et al.* (2016) y van Hal *et al.* (2019) ayudan a contextualizar el debate sobre uso de tierra, recursos y conversión de biomasa en sistemas pecuarios, mientras que Runting *et al.* (2024) muestran que la sostenibilidad ganadera exige equilibrar producción, rentabilidad y efectos ambientales. En este marco, el FVH de maíz puede ser una herramienta útil, pero no debe presentarse como sostenible por definición: su impacto depende de energía, agua, semilla, manejo, escala y costos de implementación. La Tabla 3 sintetiza ocho estudios directos sobre

el uso de FVH de maíz en terneros y bovinos jóvenes, destacando sus enfoques metodológicos, variables evaluadas, aportes principales y alcance de aplicación.

Tabla 3. Síntesis de ocho estudios directos sobre FVH de maíz en terneros y bovinos jóvenes

Referencia	Animales / sistema	Enfoque del estudio	Variables principales	Aporte para la revisión	Alcance de interpretación
Rajkumar <i>et al.</i> (2018)	18 terneros cruzados destetados	Sustitución parcial del alimento iniciador con forraje hidropónico	Consumo, ganancia de peso, conversión alimenticia, digestibilidad y costo por kg de ganancia	Aporta evidencia directa sobre el uso del FVH de maíz como sustituto parcial en la dieta de terneros, con énfasis productivo y económico	Ensayo localizado; los resultados deben interpretarse dentro del sistema experimental evaluado
Dadhich <i>et al.</i> (2019)	Terneros Rathí	Utilización de nutrientes con FVH de maíz	Digestibilidad y aprovechamiento de nutrientes	Apoya la discusión sobre el valor nutricional del FVH de maíz en terneros	Limitado a condiciones del ensayo; considerar dieta base, manejo del FVH y categoría animal antes de extrapolar.
Dadhich <i>et al.</i> (2020)	Terneros Rathí	Efecto del FVH de maíz sobre la fermentación ruminal	Parámetros ruminales	Permite discutir el posible efecto del FVH de maíz sobre la actividad fermentativa y el ambiente ruminal	Útil para discutir fermentación ruminal; no infiere efectos productivos de largo plazo.
Dadhich <i>et al.</i> (2021)	Terneros Rathí	Evaluación económica de la alimentación con FVH de maíz	Costos de alimentación y economía del sistema	Aporta respaldo para analizar la viabilidad económica del FVH de maíz como alternativa de alimentación	Evidencia económica inicial; viabilidad depende de costos locales de semilla, agua, energía, infraestructura y mano de obra.

Referencia	Animales / sistema	Enfoque del estudio	Variables principales	Aporte para la revisión	Alcance de interpretación
Arif <i>et al.</i> (2023)	12 terneros búfalos de 8 a 10 meses	Inclusión de FVH de maíz en la dieta de búfalos jóvenes	Crecimiento, balance de nitrógeno, digestibilidad, hematología y metabolitos sanguíneos	Es una de las fuentes más completas, porque integra variables productivas, digestivas, metabólicas y de salud	Muestra pequeña y duración experimental limitada; no permite generalizar a todos los sistemas ganaderos
Castillo <i>et al.</i> (2023)	Terneros búfalos	Sustitución parcial de concentrados con forraje hidropónico de maíz	Evaluación nutricional, consumo, crecimiento y costos	Refuerza la utilidad del FVH de maíz como alternativa parcial frente al alimento concentrado	Interpretar como sustitución parcial de concentrados, no como reemplazo total de la dieta.
Benu <i>et al.</i> (2024)	Terneros destetados Ongole × Brahman	Reemplazo de ensilaje de pasto por FVH de maíz	Consumo, digestibilidad, parámetros ruminales y metabolitos sanguíneos	Aporta evidencia reciente sobre el uso del FVH de maíz como forraje alternativo en terneros destetados	Evidencia reciente en reemplazo parcial de forraje convencional; depende de dieta base y condiciones del ensayo.
Joshi <i>et al.</i> (2024)	36 terneros machos Gir	FVH de maíz con y sin probiótico <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Peso corporal, ganancia diaria, medidas corporales y conversión alimenticia	Permite discutir el uso del FVH de maíz combinado con aditivos nutricionales para mejorar el desempeño productivo	Debe separarse el efecto propio del FVH de maíz del efecto del probiótico

Nota. FVH = forraje verde hidropónico. La tabla resume estudios directamente relacionados con FVH de maíz en terneros, búfalos jóvenes, bovinos jóvenes o terneras. Los alcances de interpretación se formularon para evitar generalizaciones no sustentadas fuera de las condiciones experimentales reportadas.

Discusión

Los resultados revisados permiten sostener que el FVH de maíz es una alternativa con potencial para la alimentación de terneros, pero su valor real depende de cómo se integre en la dieta. La evidencia más sólida apunta a su uso como sustituto parcial, no como reemplazo total de la alimentación convencional. Esta diferencia es importante, porque en terneros el equilibrio entre energía, proteína, fibra efectiva y materia seca disponible es determinante para lograr crecimiento sin comprometer la salud digestiva.

Desde el punto de vista nutricional, los trabajos de Rajkumar *et al.* (2018), Dadhich *et al.* (2019) y Arif *et al.* (2023) sugieren que el FVH de maíz puede mejorar el aprovechamiento de la dieta o, al menos, mantener respuestas productivas aceptables cuando reemplaza parcialmente otros ingredientes. Sin embargo, los resultados no deben leerse como una receta única. El FVH es un material fresco con alta humedad, y su aporte real depende de la materia seca consumida. Por eso, cualquier recomendación práctica debe formularse sobre base seca y considerando la dieta total.

En crecimiento y eficiencia alimenticia, Rajkumar *et al.* (2018) y Joshi *et al.* (2024) muestran respuestas favorables en

terneros. El aporte de Joshi *et al.* (2024) es interesante porque incorpora probióticos, pero también obliga a separar los efectos: parte de la respuesta puede deberse al FVH, parte al probiótico y parte a la interacción entre ambos. Esto confirma una brecha metodológica: se necesitan estudios que comparen niveles de FVH con diseños más simples y replicables, especialmente en sistemas pequeños donde el productor requiere recomendaciones claras.

La información ruminal y sanguínea aporta una lectura más completa. Dadhich *et al.* (2020), Arif *et al.* (2023) y Benu *et al.* (2024) permiten relacionar el FVH con fermentación ruminal, metabolitos y estado general del animal. Aun así, la mayoría de estos estudios tiene muestras pequeñas y duración limitada. Esto no invalida sus hallazgos, pero sí limita la fuerza de las conclusiones cuando se quiere extrapolar a diferentes razas, edades, climas y formas de manejo.

En el plano económico y ambiental, el FVH de maíz se presenta como una opción atractiva porque puede producirse en espacios reducidos y apoyar la disponibilidad de forraje durante épocas críticas. Rajkumar *et al.* (2018), Dadhich *et al.* (2021) y Castillo *et al.* (2023) ofrecen argumentos sobre costos y sustitución de concentrados, mientras que Ertl *et al.* (2016), van Hal *et al.* (2019) y Runting *et al.* (2024) ayudan

a ubicar el debate en una mirada más amplia sobre uso de recursos, productividad y sostenibilidad. Sin embargo, todavía son escasos los estudios que integran en una sola evaluación el costo de infraestructura, semilla, agua, energía, mano de obra, sanidad del cultivo y respuesta animal.

En síntesis, el FVH de maíz no debe verse como una moda tecnológica, sino como una herramienta que puede ser útil bajo ciertas condiciones. Su mayor valor aparece cuando ayuda a estabilizar la oferta de alimento, reducir presión sobre concentrados, mejorar el consumo o apoyar el crecimiento de terneros. Pero para recomendarlo con seguridad hacen falta protocolos más comparables, análisis económicos completos y evaluaciones de sostenibilidad ajustadas a la realidad de pequeños productores.

Conclusiones

El forraje verde hidropónico de maíz muestra potencial como alternativa alimenticia para terneros y bovinos jóvenes, especialmente cuando se utiliza como sustituto parcial de concentrados o forrajes convencionales. La evidencia revisada indica aportes en consumo, ganancia de peso, eficiencia alimenticia, digestibilidad, parámetros ruminales, metabolitos sanguíneos y costos de alimentación.

Los beneficios del FVH de maíz dependen del nivel de inclusión, la calidad del cultivo hidropónico, la dieta base, la categoría animal y las condiciones de manejo. Por tanto, no es recomendable presentarlo como alimento único ni como solución universal. Su uso debe evaluarse dentro de dietas balanceadas y con criterios de materia seca, eficiencia productiva y viabilidad económica.

La revisión también evidencia brechas importantes. Se requieren estudios de mayor duración, con muestras más amplias, protocolos estandarizados y análisis integrales que combinen nutrición, productividad, economía, salud animal y sostenibilidad ambiental. Esta necesidad es especialmente relevante para sistemas ganaderos de pequeña escala, donde la adopción de tecnologías depende tanto de su eficacia productiva como de su costo, facilidad de manejo y adaptación al territorio.

Referencias bibliográficas

- Alders, R. G. (2025). The broader symbiotic relationships between animals and humans in low-, middle- and high-income countries. *Proceedings of the Nutrition Society*, 1–4. <https://doi.org/10.1017/S0029665125101201>
- Arif, M., Khalaf, Q. A. W., Rehman, A. U., Hussain, S. M., Almohadi, N. H., Al-Baqami, N. M., Abd El-Hack, M. E., Kamal, M., Tharwat, M., y Swelum, A. A. (2023). Effects of feeding maize hydroponic fodder on growth performance, nitrogen balance, nutrient digestibility, hematology and blood metabolites of water buffalo calves. *Open Veterinary Journal*, 13(12), 1607–1613. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2023.v13.i12.10>
- Benu, I., Jelantik, I. G. N., Penu, C. L., y Laut, M. M. (2024). Effect of replacing grass silage with hydroponic maize fodder on nutrient intake and digestibility, rumen parameters and blood metabolites of weaned Ongole × Brahman calves. *Jurnal Ilmu Ternak dan Veteriner*, 29(1), 36–44. <https://doi.org/10.14334/jitv.v29i1.3331>
- Castillo, C. I., Llantada, P. L. T., Baltazar, C. P., Uy-De Guia, M. R., Amido, R. D., y Del Barrio, A. N. (2023). Nutritional evaluation of hydroponic corn fodder and its effect as substitute for feed concentrates for buffalo calves. *The Philippine Agricultural Scientist*, 106(4), 369–379. <https://doi.org/10.62550/AF011023>
- Dadhich, R., Dhuria, R. K., Jain, D., Nehra, R., y Sharma, T. (2019). Effect of feeding of hydroponics maize fodder on nutrient utilisation efficiency in Rathi calves. *Veterinary Practitioner*, 20(2), 291–294. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203263145>
- Dadhich, R., Dhuria, R. K., Nehra, R., Jain, D., y Sharma, T. (2020). Effect of feeding of hydroponics maize fodder on rumen parameters in Rathi calves. *Veterinary Practitioner*, 21(1), 142–144. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20210155654>
- Dadhich, R., Dhuria, R. K., Jain, D., Nehra, R., y Sharma, T. (2021). Economics of feeding of hydroponics maize fodder in Rathi calves. *Veterinary Practitioner*, 22(1), 153. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20220220108>
- Ertl, P., Steinwider, A., Schönauer, M., Krimberger, K., Knaus, W., y Zollitsch, W. (2016). Net food production of different livestock: A national analysis for Austria including relative occupation of different land categories / Netto-Lebensmittelproduktion der Nutztierhaltung: Eine nationale Analyse für Österreich inklusive relativer Flächenbeanspruchung. *Die Bodenkultur. Journal of Land Management, Food and Environment*, 67(2), 91–103. <https://doi.org/10.1515/boku-2016-0009>
- Joshi, M., Sharma, S. K., y Vaishnav, C. S. (2024). Effect of concurrent feeding of hydroponics maize fodder and probiotic (*Saccharomyces cerevisiae*) on growth performance in Gir calves. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 43(3), 566–571. <https://doi.org/10.18805/ajdr.DR-1716>
- Kebede, D. (2016). Impact of climate change on livestock productive and reproductive performance. *Livestock Research for Rural Development*, 28(12). <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd28/12/kebe28227.htm>
- Leroy, F., Abraini, F., Beal, T., Dominguez-Salas, P., Gregorini, P., Manzano, P., Rowntree, J., y van Vliet, S. (2022). Animal board invited review: Animal source foods in healthy, sustainable, and ethical diets - An argument against drastic limitation of livestock in the food system. *Animal*, 16(3). <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100457>

- Rajkumar, G., Dipu, M. T., Lalu, K., Shyama, K., y Banakar, P. S. (2018). Evaluation of hydroponics fodder as a partial feed substitute in the ration of crossbred calves. *Indian Journal of Animal Research*, 52(12), 1809–1813. <https://doi.org/10.18805/ijar.B-3421>
- Rueda García, A. M., Fracassi, P., Scherf, B. D., Hamon, M., y Iannotti, L. (2024). Unveiling the nutritional quality of terrestrial animal source foods by species and characteristics of livestock systems. *Nutrients*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/nu16193346>
- Runting, R. K., King, D., Nolan, M., Navarro, J., Marcos-Martinez, R., Rhodes, J. R., Gao, L., Watson, I., Ash, A., Reside, A. E., Alvarez-Romero, J. G., Wells, J. A., Ritchie, E. G., Hadjikakou, M., Driscoll, D. A., Connor, J. D., Garber, J., y Bryan, B. A. (2024). Balancing livestock production and environmental outcomes in northern Australia's tropical savanna under global change. *Environmental Research Letters*, 19. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad6f2d>
- Thamo, T., Addai, D., Pannell, D. J., Robertson, M. J., Thomas, D. T., y Young, J. M. (2017). Climate change impacts and farm-level adaptation: Economic analysis of a mixed cropping–livestock system. *Agricultural Systems*, 150, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.013>
- van Hal, O., de Boer, I. J. M., Müller, A., de Vries, S., Erb, K. H., Schader, C., Gerrits, W. J. J., y van Zanten, H. H. E. (2019). Upcycling food leftovers and grass resources through livestock: Impact of livestock system and productivity. *Journal of Cleaner Production*, 219, 485–496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.329>
- Weindl, I., Lotze-Campen, H., Popp, A., Müller, C., Havlík, P., Herrero, M., Schmitz, C., y Rolinski, S. (2015). Livestock in a changing climate: Production system transitions as an adaptation strategy for agriculture. *Environmental Research Letters*, 10(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/094021>



Revisión integral del impacto epidemiológico, productivo y sanitario de *Ascaris suum* en sistemas de producción porcina

Comprehensive review of the epidemiological, production, and health impacts of *Ascaris suum* in swine production systems

Marco Antonio Alcívar Martínez , Ashley Nicole Campozano Parrales
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “ Manuel Félix López ”, Ecuador
Autor de correspondencia: marco.alcivar@espam.edu.ec

Recibido: 21/10/2025. Aceptado: 12/06/2026.
Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

Ascaris suum es un helminto frecuente en la porcicultura y sigue generando problemas de salud animal, productividad, bienestar e inocuidad. El objetivo de esta revisión fue analizar su impacto epidemiológico, productivo y sanitario en sistemas de producción porcina, a partir de literatura científica publicada entre 2010 y 2025. Se desarrolló una revisión bibliográfica narrativa integral, apoyada con búsquedas en Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect y Scopus AI. Se identificaron 126 registros potencialmente relacionados con el tema y se integró literatura científica pertinente sobre prevalencia, diagnóstico, pérdidas económicas, bioseguridad, control y riesgo zoonótico. La evidencia muestra una prevalencia variable según el sistema: 7,6 % en granjas intensivas del norte de Italia, 34,8 % en cerdos de traspatio en Myanmar y reportes de variabilidad regional de 52 % a 85 % en áreas de maternidad o manejo familiar. En sistemas orgánicos o near-organic se informó hasta 74 % de infección en cerdos de acabado. En el plano productivo, se han documentado reducciones de 16,8 g/día en ganancia diaria de peso y pérdidas de USD 6,50 ± 3,20 por cerdo infectado, además de lesiones hepáticas tipo milk spots. En diagnóstico, ELISA (Ensayo por inmunoabsorción ligado a enzimas) detectó mayor exposición que la flotación fecal (69 % vs. 13 %), lo que evidencia que la coproparasitología puede subestimar infecciones. Se concluye que el control debe integrar higiene, bioseguridad, manejo ambiental, desparasitación estratégica y vigilancia serológica.

Palabras clave: ascariosis, helmintiasis porcina, sanidad animal, bioseguridad, zoonosis.

Abstract

Ascaris suum is a common helminth in pig production and continues to cause problems related to animal health, productivity, welfare, and food safety. The objective of this review was to analyze its epidemiological, productive, and health impact in swine production systems based on scientific literature published between 2010 and 2025. A comprehensive narrative literature review was conducted, supported by searches in Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, and Scopus AI. A total of 126 records potentially related to the topic were identified, and relevant scientific literature on prevalence, diagnosis, economic losses, biosecurity, control, and zoonotic risk was integrated. The evidence shows variable prevalence according to production system: 7.6% in intensive farms in northern Italy, 34.8% in backyard pigs in Myanmar, and regional variability from 52% to 85% in farrowing or family-based areas. In organic or near-organic systems, infection reached up to 74% in finishing pigs. In productive terms, reductions of 16.8 g/day in average daily gain and losses of USD 6.50 ± 3.20 per infected pig have been reported, together with liver lesions known as milk spots. Regarding diagnosis, ELISA (Ensayo por inmunoabsorción ligado a enzimas) detected higher exposure than fecal flotation (69% vs. 13%), showing that coprological methods may underestimate infection. It is concluded that control should integrate hygiene, biosecurity, environmental management, strategic deworming, and serological surveillance..

Keywords: ascariasis, swine helminthiasis, animal health, biosecurity, zoonosis.

Introducción

La producción porcina es una actividad clave para la seguridad alimentaria, porque aporta proteína de alto valor biológico y sostiene cadenas productivas vinculadas con empleo, comercio y abastecimiento de alimentos. Sin embargo, su intensificación también aumenta la presión sanitaria dentro de las granjas, especialmente cuando existen fallas en limpieza, manejo de estiércol, densidad animal o control de parásitos gastrointestinales (Roepstorff *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2020).

Entre las parasitosis de mayor importancia se encuentra la ascariosis porcina, causada por *Ascaris suum*. Este nematodo tiene una alta capacidad de persistencia ambiental, porque sus huevos pueden mantenerse viables durante largos periodos en corrales, camas, potreros y suelos contaminados. Por eso, incluso granjas tecnificadas pueden presentar reinfecciones cuando las medidas de bioseguridad no son constantes o cuando el control se limita únicamente a desparasitaciones aisladas (Katakam *et al.*, 2016; Lindgren *et al.*, 2020).

El impacto de *A. suum* no se reduce a la presencia del parásito adulto en el intestino. La migración larvaria produce lesiones hepáticas conocidas como manchas de leche o milk spots, que son detectadas durante la inspección post-mortem y pueden provocar decomiso de hígados. Además, la infección se ha relacionado con menor ganancia de peso, alteraciones en el transporte intestinal de nutrientes, reducción de eficiencia alimenticia y pérdidas económicas por menor rendimiento o afectación de la calidad de la canal (Boes *et al.*, 2010; Koehler *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022).

La epidemiología de la infección depende de una mezcla de factores: sistema de producción, edad de los animales, acceso a pasturas, humedad, temperatura, limpieza de corrales, manejo all-in/all-out, uso de camas, tratamiento de excretas y presión de infección en el ambiente. Por ello, los sistemas al aire libre, orgánicos, de traspatio y de pequeños productores suelen tener mayor exposición, aunque los sistemas intensivos tampoco están completamente libres del problema (Mendes *et al.*, 2017; Allievi *et al.*, 2024; Senanayake *et al.*, 2025).

Desde la salud pública, *A. suum* también interesa por su posible relación zoonótica con *Ascaris lumbricoides*. La literatura reciente documenta infecciones mixtas o híbridas entre *Ascaris* de origen porcino y humano, lo que obliga a mirar el problema desde el enfoque One Health, donde se integran salud animal, salud humana y ambiente (Ajibo *et al.*, 2020; Boeira *et al.*, 2025).

A pesar de la abundancia de estudios, la evidencia está dispersa y usa métodos diagnósticos distintos, como flotación fecal, recuento de huevos por gramo, inspección de hígados y pruebas serológicas. Esta diversidad complica la comparación entre regiones y sistemas productivos. Por ello, el objetivo de este artículo fue analizar el impacto epidemiológico, productivo y sanitario de *Ascaris suum* en la producción porcina, mediante una revisión crítica de literatura científica publicada entre 2010 y 2025, para aportar evidencia útil al

diseño de estrategias sostenibles de prevención y control.

Materiales y Métodos

La investigación corresponde a una revisión narrativa integral. Este enfoque permitió reunir, organizar y analizar literatura científica relacionada con *Ascaris suum* en sistemas de producción porcina intensivos, orgánicos, al aire libre, de traspatio y de pequeños productores. La revisión se estructuró en seis ejes temáticos: epidemiología y prevalencia, factores de riesgo, impacto productivo y económico, métodos de diagnóstico, estrategias de control y riesgo zoonótico. A partir de estos ejes, se integraron estudios relevantes publicados entre 2010 y 2025, priorizando aquellos que aportaran evidencia directa sobre la dinámica sanitaria, productiva y epidemiológica del parásito.

La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, Latindex, SciELO, Redalyc, Semantic Scholar y Google Académico. También se utilizó Scopus AI, herramienta de apoyo bibliográfico de Elsevier, para ampliar términos de búsqueda, identificar autores recurrentes, agrupar resultados por áreas temáticas y reconocer tendencias de investigación. Su uso fue exploratorio y complementario: las citas, datos cuantitativos, DOI y afirmaciones incorporadas fueron revisadas y validadas por los autores con base en los documentos originales.

Los descriptores se trabajaron en español, inglés y portugués, combinando términos como *Ascaris suum*, swine roundworm, prevalencia, prevalence, coproparasitología, fecal flotation, ELISA, milk spots, carcass condemnation, average daily gain, biosecurity, anthelmintic resistance, outdoor pigs, organic farms, backyard pigs y One Health. Las combinaciones booleanas se organizaron por propósito de búsqueda, como se muestra en la Tabla 1.

Durante la fase inicial se identificaron 126 registros potencialmente relacionados con el tema. La literatura recuperada fue revisada según su pertinencia temática, actualidad, claridad metodológica y aporte al análisis de *Ascaris suum* en la producción porcina. Posteriormente, los documentos más relevantes fueron organizados de acuerdo con los ejes definidos para la revisión narrativa. Los estudios que aportaron datos comparativos sobre prevalencia, diagnóstico, impacto productivo, pérdidas económicas, bioseguridad, control o riesgo zoonótico se sintetizan en la Tabla 3.

Para organizar la revisión, se definieron criterios de pertinencia temática y delimitación bibliográfica que orientaron la lectura, clasificación y síntesis de los documentos recuperados. Estos criterios permitieron priorizar literatura científica actual, verificable y directamente relacionada con *Ascaris suum* en cerdos, así como ordenar los estudios según su aporte a los ejes temáticos de la revisión narrativa. Estos criterios se detallan en la Tabla 2.

Tabla 1. Búsquedas booleanas utilizadas en la revisión bibliográfica sobre *Ascaris suum*

Base de datos	Cadena de búsqueda en español	Cadena de búsqueda en inglés	Propósito	Notas
SciELO, Redalyc, Google Académico	" <i>Ascaris suum</i> " OR "parasitismo porcino" AND "prevalencia" OR "incidencia" AND "cerdos"	" <i>Ascaris suum</i> " OR "swine roundworm" AND "prevalence" OR "incidence" AND "pigs"	Identificar prevalencia en porcicultura	Útil para estudios epidemiológicos generales
PubMed, Scopus, Google Académico	" <i>Ascaris suum</i> " AND "zoonosis" AND "salud pública"	" <i>Ascaris suum</i> " AND "zoonosis" AND "public health"	Analizar riesgo zoonótico	Priorizar estudios con enfoque One Health
Scopus, ScienceDirect, PubMed	" <i>Ascaris suum</i> " AND "ganancia de peso" OR "manchas hepáticas" AND "pérdidas económicas"	" <i>Ascaris suum</i> " AND "growth performance" OR "milk spots" AND "economic losses"	Evaluar impacto productivo	Incluir rendimiento, canal y decomisos
Scopus, PubMed, Latindex	" <i>Ascaris suum</i> " AND "ELISA" OR "copro-parasitología" AND "sensibilidad"	" <i>Ascaris suum</i> " AND "ELISA" OR "fecal flotation" AND "diagnostic accuracy"	Comparar métodos diagnósticos	Considerar ELISA, EPG e inspección de hígados
Scopus, PubMed, Web of Science	" <i>Ascaris suum</i> " AND "bioseguridad" OR "desparasitación" AND "control"	" <i>Ascaris suum</i> " AND "biosecurity" OR "deworming" AND "control"	Revisar control sanitario	Priorizar control integrado y manejo ambiental

Tabla 2. Criterios de pertinencia temática aplicados en la revisión narrativa

Criterios de priorización temática	Criterios de delimitación bibliográfica
Artículos científicos revisados por pares, publicados entre 2010 y 2025.	Documentos sin arbitraje académico o informes institucionales sin trazabilidad suficiente.
Estudios en inglés, español o portugués.	Documentos sin acceso al texto completo o sin información metodológica mínima.
Investigaciones sobre prevalencia, diagnóstico, impacto, control o zoonosis de <i>A. suum</i> en cerdos.	Estudios exclusivamente humanos sin vínculo con transmisión porcina o ambiente contaminado.
Estudios originales, revisiones o reportes técnicos con resultados trazables.	Artículos duplicados, notas breves sin datos verificables o documentos fuera del rango temporal.
Publicaciones en revistas indexadas o con comité editorial reconocido.	Trabajos centrados en parásitos no relacionados con <i>A. suum</i> o sin diferenciación clara por especie.

Limitaciones de la revisión

Por su enfoque narrativo, los resultados se presentan como una síntesis crítica de la evidencia disponible sobre *Ascaris suum* en la producción porcina. La interpretación de los estudios se realizó considerando la pertinencia temática, la actualidad de la información, la trazabilidad de los datos y la relación directa con los sistemas de producción, diagnóstico, control sanitario, bioseguridad y riesgo zoonótico.

La amplitud de la literatura recuperada pudo estar influida por la disponibilidad de textos completos, el idioma de publicación y la forma en que las bases indexan los estudios veterinarios y agropecuarios. Además, los estudios

revisados presentan heterogeneidad en diseño, país, edad de los animales, sistema productivo, técnica diagnóstica y unidades de reporte, lo que condiciona la comparación directa de prevalencias, cargas parasitarias, resultados serológicos y pérdidas económicas.

Al tratarse de una revisión narrativa, no se registró protocolo PRISMA ni se aplicaron herramientas formales de evaluación metodológica como GRADE o AMSTAR; por ello, los resultados deben interpretarse como una síntesis crítica y no como una revisión sistemática.

Resultados

Epidemiología y prevalencia

La prevalencia de *A. suum* cambia mucho entre regiones y sistemas de producción. En granjas intensivas del norte de Italia, Allievi *et al.* (2024) reportaron 7,6 % de animales positivos y 45,4 % de granjas afectadas, lo que demuestra que el parásito puede mantenerse incluso en sistemas con mayor tecnificación. En contraste, en sistemas de traspato de Myanmar, Bawm *et al.* (2024) informaron 34,8 % de positividad y variaciones regionales elevadas, asociadas con diferencias de manejo, limpieza y contacto con suelo contaminado.

Los sistemas orgánicos y al aire libre presentan una dinámica particular, porque el acceso a pasturas aumenta la exposición a huevos embrionados. Lindgren *et al.* (2020) y Katakam *et al.* (2016) muestran que los huevos pueden acumularse tanto en animales como en suelos de pastoreo, mientras que Fischer *et al.* (2024) reportaron infección en 27 % de cerdos criados al aire libre y 82 % de granjas afectadas. Estos hallazgos coinciden con Mendes *et al.* (2017), quienes relacionaron la ascariosis porcina con determinantes ambientales y espaciales en Inglaterra.

En Asia, Zheng *et al.* (2020) describieron alta seroprevalencia anti-*Ascaris* en cerdos de engorde de Sichuan, lo que refuerza la utilidad de la vigilancia serológica en granjas donde la coproparasitología puede no captar toda la exposición. En Europa, Senanayake *et al.* (2025) relacionaron la presencia de parásitos gastrointestinales en cerdos al aire libre con estación, edad y prácticas de manejo. En África, Addy *et al.* (2023) y Ajibo *et al.* (2020) confirman que los sistemas comunitarios o de baja bioseguridad mantienen alta exposición a parásitos gastrointestinales con potencial zoonótico.

En síntesis, la prevalencia no depende únicamente de si la granja es intensiva, orgánica o de traspato. La evidencia apunta a una interacción entre ambiente, edad, limpieza, uso de pasturas, manejo de estiércol y sensibilidad del método diagnóstico empleado.

Impacto productivo y económico

La infección por *A. suum* afecta la productividad porcina por mecanismos directos e indirectos. Boes *et al.* (2010) demostraron que el efecto sobre el rendimiento puede variar según la intensidad de la infección, mientras que Koehler *et al.* (2021) explicaron que el parásito altera procesos de transporte intestinal de nutrientes, lo que ayuda a entender la reducción de crecimiento observada en animales expuestos de forma repetida.

En el plano económico, Oba *et al.* (2023) estimaron pérdidas de USD 6,50 ± 3,20 por cerdo infectado, asociadas con una reducción de 16,8 g/día en la ganancia diaria de peso. Li *et al.* (2022), en cerdos criados bajo condiciones near-organic, encontraron 45 % de infección en crecimiento,

74 % en acabado, lesiones hepáticas en todos los animales sacrificados y presencia de parásitos adultos en 78 % de los casos. Este conjunto de hallazgos permite ver que la pérdida no se limita al hígado decomisado, sino que también involucra crecimiento, canal y eficiencia alimenticia.

La industria de productos porcinos de alto valor también puede verse afectada. Massaglia *et al.* (2018) señalaron que la ascariosis incrementa costos de alimentación y reduce ingresos en granjas vinculadas con jamones curados italianos con denominación de origen. De manera complementaria, Allievi *et al.* (2025) documentaron lesiones hepáticas compatibles con migración larvaria en monitoreo de matadero, mostrando que la inspección post-mortem es útil para dimensionar el impacto subclínico del parásito.

La lectura crítica de estos estudios muestra que el impacto económico debe analizarse como un problema acumulativo: menor crecimiento, más alimento por kilogramo producido, decomiso de vísceras, pérdida de calidad de canal y mayor gasto en tratamientos o manejo sanitario.

Métodos de diagnóstico

Los métodos diagnósticos más usados son la flotación fecal, el recuento de huevos por gramo, la inspección de hígados por milk spots y las pruebas serológicas. Cada método mide un aspecto diferente del proceso infeccioso. La coproparasitología identifica eliminación de huevos, pero puede fallar cuando existen infecciones larvares, infecciones recientes o cargas bajas; la inspección de hígados refleja migración larvaria, pero solo se observa al sacrificio; y ELISA permite estimar exposición del lote antes de que el problema sea evidente por huevos en heces (Vlaminck *et al.*, 2016; Joachim *et al.*, 2021).

Joachim *et al.* (2021) compararon métodos en granjas porcinas de Austria y observaron una diferencia marcada: 19 % de hígados con milk spots, 13 % de muestras fecales positivas por flotación y 69 % de muestras sanguíneas positivas mediante ELISA. Vismarra *et al.* (2023) también encontraron diferencias amplias entre seroprevalencia y lesiones hepáticas, con valores de seroprevalencia entre 36,4 % y 100 % según antígeno utilizado. Estos resultados explican por qué un programa de vigilancia basado solo en heces puede subestimar la exposición real.

Martínez-Pérez *et al.* (2017) relacionaron la detección serológica de *A. suum* con indicadores de desempeño y manejo en granjas de engorde. Tassis *et al.* (2022), por su parte, utilizaron evaluación serológica en granjas griegas y asociaron la exposición con factores de riesgo, incluyendo la presencia de *Lawsonia intracellularis*. En conjunto, la evidencia respalda usar ELISA como herramienta de vigilancia de lote, sin abandonar los recuentos EPG ni la inspección sanitaria en matadero.

Respuesta inmunológica

La respuesta inmune frente a *A. suum* es compleja porque el parásito atraviesa intestino, hígado y pulmones antes de establecerse como adulto. Oser *et al.* (2024) describieron en cerdos jóvenes una respuesta Th2 localizada y retardada en el intestino, dentro de un escenario de expansión sistémica Th1. Esta combinación ayuda a entender por qué el parásito puede persistir y por qué no siempre existe una relación lineal entre exposición, eliminación de huevos y daño tisular.

Elizalde-Velázquez *et al.* (2024) mostraron que las larvas migratorias inducen respuestas Th2 asociadas con inflamación hepática y pulmonar, eosinofilia e incremento de IL-5 e IL-13. Aunque su modelo no corresponde a una granja porcina comercial, aporta una explicación biológica del daño generado durante la migración larvaria. Musimbi *et al.* (2025) complementan esta evidencia al reportar respuestas IgA, IgG1 e IgG2 frente a antígenos excretorios-secretorios de *Ascaris* en cerdos, lo que abre posibilidades para diagnóstico temprano y seguimiento de exposición.

Vlaminck *et al.* (2016) identificaron el antígeno As12 como un blanco importante de anticuerpos en cerdos y humanos infectados. Aunque la vacunación con esta fracción no logró protección completa, su utilidad diagnóstica fue relevante. Esto confirma que la respuesta inmunológica no solo ayuda a explicar la patología, sino que también puede mejorar la vigilancia sanitaria.

Riesgo zoonótico

El riesgo zoonótico de *A. suum* debe entenderse en un contexto de contacto entre cerdos, personas, estiércol y suelos contaminados. Ajibo *et al.* (2020) documentaron infecciones por parásitos porcinos zoonóticos en Nigeria, mientras que Addy *et al.* (2023) evidenciaron alta circulación de parásitos gastrointestinales en cerdos comunitarios de Ghana, lo que sugiere que la baja bioseguridad puede favorecer exposición compartida entre animales, productores y ambiente.

Boeira *et al.* (2025) aportaron evidencia clave al reportar infecciones híbridas o mixtas por *Ascaris* de origen porcino y humano en una comunidad indígena de Brasil. Esta información refuerza la necesidad de aplicar un enfoque One Health, especialmente en territorios donde el estiércol porcino se usa como fertilizante o donde existe convivencia estrecha entre familias y animales.

Jones *et al.* (2024) analizaron aislamientos de *Ascaris* de origen porcino y humano y no encontraron mutaciones canónicas de resistencia a benzimidazoles en genes de beta-tubulina, lo que es tranquilizador para el uso actual de antihelmínticos. Sin embargo, este hallazgo no elimina la necesidad de vigilancia, porque el uso repetido e indiscriminado de desparasitantes puede generar presión de selección. Por ello, la prevención debe combinar diagnóstico, manejo ambiental y tratamientos estratégicos.

Tabla 3. Evidencia principal sobre *Ascaris suum* en sistemas de producción porcina

Estudio (año)	País / sistema	Muestra o enfoque	Hallazgo principal
Allievi <i>et al.</i> , 2024	Italia / intensivo	880 cerdos en granjas de engorde	7,6 % de animales infectados y 45,4 % de granjas positivas; persistencia en sistemas tecnificados.
Allievi <i>et al.</i> , 2025	Italia / matadero	Canales porcinos inspeccionados longitudinalmente	Monitoreo de lesiones hepáticas por larvas; alta utilidad del matadero para vigilancia de infección subclínica.
Bawm <i>et al.</i> , 2024	Myanmar / traspatio	200 cerdos de pequeños productores	34,8 % positivos; infecciones mixtas y variabilidad regional asociada al manejo.
Vismarra <i>et al.</i> , 2023	Italia / engorde	Cerdos de granja y datos de matadero	Seroprevalencia entre 36,4 % y 100 %; lesiones hepáticas entre 3,8 % y 98,3 %.
Zheng <i>et al.</i> , 2020	China / engorde	Granjas porcinas de Sichuan	Alta seroprevalencia anti- <i>Ascaris</i> ; necesidad de mejorar manejo y vigilancia.
Lindgren <i>et al.</i> , 2020	Suecia / orgánico	Suelos de pastura y cerdos	Huevos de nematodos en pasturas; el suelo funciona como reservorio de infección.

Estudio (año)	País / sistema	Muestra o enfoque	Hallazgo principal
Katakam <i>et al.</i> , 2016	Dinamarca / orgánico	Granjas orgánicas porcinas	Contaminación ambiental y transmisión sostenida de <i>A. suum</i> en sistemas con acceso exterior.
Mendes <i>et al.</i> , 2017	Inglaterra / multigranja	Estudio multinivel	La ascariosis se asocia con determinantes ambientales y variación espacial entre granjas.
Senanayake <i>et al.</i> , 2025	Irlanda / exterior	Cerdos criados al aire libre	Efecto de estación, edad y prácticas de manejo sobre parásitos gastrointestinales.
Fischer <i>et al.</i> , 2024	Alemania / aire libre	Granjas con cerdos al aire libre	27 % de animales infectados y 82 % de granjas afectadas; acceso a pasto y limpieza influyen en riesgo.
Addy <i>et al.</i> , 2023	Ghana / comunitario	56 cerdos de distritos rurales	91,1 % con parásitos gastrointestinales; <i>A. suum</i> entre las especies detectadas; mayor frecuencia en animales jóvenes.
Ajibo <i>et al.</i> , 2020	Nigeria / granjas	Parásitos porcinos zoonóticos	Evidencia de parásitos con importancia One Health en sistemas de baja bioseguridad.
Boes <i>et al.</i> , 2010	Dinamarca / engorde	Cerdos de engorde infectados	El efecto sobre desempeño depende de intensidad y duración de infección.
Koehler <i>et al.</i> , 2021	Alemania / experimental	Fisiología intestinal porcina	La infección modifica transporte de nutrientes y ayuda a explicar menor rendimiento.
Li <i>et al.</i> , 2022	EE. UU. / near-organic	150 cerdos	45 % infectados en crecimiento, 74 % en acabado, 100 % con milk spots y 78 % con parásitos adultos.
Oba <i>et al.</i> , 2023	Uganda / doméstico	Cerdos en engorde	Reducción de 16,8 g/día en ganancia de peso y pérdidas de USD 6,50 ± 3,20 por cerdo.
Massaglia <i>et al.</i> , 2018	Italia / industria PDO	Granjas asociadas a jamones curados	Incremento de costos de alimentación y reducción de ingresos por ascariosis.
Joachim <i>et al.</i> , 2021	Austria / diagnóstico	844 hígados y muestras fecales/sangre	19 % con milk spots; 13 % positivos por flotación; 69 % positivos por ELISA.
Vlaminck <i>et al.</i> , 2016	Bélgica / experimental	Antígeno As12 en cerdos y humanos	As12 mostró sensibilidad y especificidad diagnóstica altas para exposición a <i>Ascaris</i> .

Estudio (año)	País / sistema	Muestra o enfoque	Hallazgo principal
Oser <i>et al.</i> , 2024	Alemania / experimental	Cerdos jóvenes	Respuesta Th2 intestinal localizada y retardada en un entorno de expansión Th1.
Elizalde-Velázquez <i>et al.</i> , 2024	México-Alemania / experimental	Modelo de migración larvaria	Respuesta Th2, eosinofilia, IL-5 e IL-13 vinculadas con daño en hígado y pulmones.
Musimbi <i>et al.</i> , 2025	Experimental / porcino	Cerdos infectados	Inducción de IgA, IgG1 e IgG2 frente a antígenos excretorios-secretorios.
Boeira <i>et al.</i> , 2025	Brasil / One Health	Humanos, cerdos y ambiente	Infecciones híbridas o mixtas por <i>Ascaris</i> humano y porcino; riesgo zoonótico.
Jones <i>et al.</i> , 2024	Mundial / molecular	Aislamientos humanos y porcinos	Ausencia de mutaciones canónicas de resistencia a benzimidazoles en beta-tubulina.

Discusión

La evidencia revisada permite afirmar que *A. suum* sigue siendo un problema vigente para la porcicultura, aun cuando su presencia muchas veces pasa desapercibida. El parásito puede mantenerse en granjas intensivas, pero alcanza mayor importancia en sistemas donde los animales tienen contacto con suelo, camas contaminadas o estiércol mal manejado. Esta lectura coincide con la evidencia de Allievi *et al.* (2024), Lindgren *et al.* (2020), Katakam *et al.* (2016) y Fischer *et al.* (2024), quienes muestran que el ambiente funciona como un reservorio difícil de eliminar.

El impacto productivo es más claro cuando se analiza como un fenómeno acumulativo. Una infección leve puede no reflejarse de inmediato en la ganancia de peso, como advierte Boes *et al.* (2010), pero la exposición repetida puede modificar la fisiología intestinal y afectar la eficiencia alimenticia, como explican Koehler *et al.* (2021). A esto se suman las pérdidas directas por decomiso de hígados y las pérdidas indirectas por menor calidad de canal, incremento de costos y reducción de ingresos, especialmente en cadenas de mayor valor comercial (Massaglia *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2022; Oba *et al.*, 2023).

La comparación de métodos diagnósticos muestra uno de los puntos más importantes de la revisión. La flotación fecal y el EPG son útiles, económicos y aplicables en campo, pero pueden subestimar la exposición del lote. La inspección de hígados ayuda a vigilar daño por migración larvaria, aunque llega tarde porque ocurre en matadero. En cambio, ELISA permite identificar exposición con mayor sensibilidad, como se observó en Austria con 69 % de positividad frente a 13 % por flotación fecal (Joachim *et al.*, 2021). Por ello, la vigilancia más sólida debería combinar métodos coproparasitológicos, serológicos y hallazgos post-mortem.

El componente inmunológico también aporta elementos para interpretar la persistencia del parásito. Los estudios de Oser *et al.* (2024), Elizalde-Velázquez *et al.* (2024), Musimbi *et al.* (2025) y Vlaininck *et al.* (2016) muestran que la migración larvaria activa respuestas inflamatorias y humorales, pero estas no siempre garantizan protección completa. Esta situación explica por qué la prevención debe orientarse más a reducir presión ambiental y exposición del lote que a esperar una inmunidad natural suficiente.

Desde la salud pública, los hallazgos de Boeira *et al.* (2025), Ajibo *et al.* (2020) y Addy *et al.* (2023) justifican mirar la ascariosis porcina desde el enfoque One Health. El problema no termina en la granja: los huevos resistentes pueden permanecer en el ambiente, contaminar suelos y mantener ciclos compartidos entre animales y personas. En zonas rurales, donde hay contacto estrecho con animales o uso de estiércol como fertilizante, este riesgo merece mayor vigilancia.

En términos de control, la desparasitación estratégica es necesaria, pero no suficiente. Vandekerckhove *et al.* (2019) muestran que los tratamientos deben acompañarse de monitoreo y manejo técnico. La evidencia revisada respalda una estrategia integrada basada en limpieza frecuente, manejo adecuado de excretas, rotación y descanso de corrales o potreros, control de camas, reducción de humedad, aplicación ordenada de antihelmínticos, educación sanitaria de productores y uso de pruebas serológicas cuando sea posible. Así, el control deja de ser una acción puntual y se convierte en un proceso permanente de gestión sanitaria.

Conclusiones

Ascaris suum continúa siendo un parásito de alta importancia en la producción porcina por su capacidad de persistir en el ambiente, reinfectar lotes y generar efectos sanitarios, productivos y económicos. Su presencia no se limita a sistemas de traspaso; también puede mantenerse en sistemas intensivos cuando existen fallas de manejo, limpieza o bioseguridad.

La evidencia revisada muestra que el impacto productivo se expresa mediante menor ganancia diaria de peso, alteraciones en eficiencia alimenticia, lesiones hepáticas tipo milk spots, decomiso de hígados y reducción de ingresos. Por tanto, el costo real de la ascariosis no debe calcularse solo por vísceras descartadas, sino también por pérdidas acumuladas en rendimiento, alimentación, calidad de canal y bienestar animal.

El diagnóstico debe fortalecerse mediante el uso combinado de coproparasitología, recuentos EPG, inspección post-mortem y pruebas serológicas. La diferencia observada entre ELISA y flotación fecal demuestra que depender únicamente de heces puede subestimar la exposición real del lote.

Finalmente, se requiere avanzar en la estandarización de paneles ELISA y puntos de corte de huevos por gramo, especialmente en regiones tropicales húmedas y sistemas con alta exposición ambiental. Esta estandarización permitiría comparar estudios, detectar exposición subclínica y orientar programas de desparasitación estratégica dentro de un enfoque integrado de bioseguridad y One Health.

Referencias bibliográficas

- Addy, F., Adu-Bonsu, G., Akurigo, C. A., Abukari, I., Suleman, H., y Quaye, L. (2023). Prevalence of gastrointestinal parasites in pigs: A preliminary study in Tolon and Kumbungu districts, Ghana. *Journal of Parasitology Research*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/1308329>
- Ajibo, F. E., Njoga, E. O., Azor, N., Idika, I. K., y Nwanta, J. A. (2020). Epidemiology of infections with zoonotic pig parasites in Enugu State, Nigeria. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2020.100397>
- Allievi, C., Lana, E., Rizzi, R., Zanon, A., Mortarino, M., y Manfredi, M. T. (2025). Abattoir monitoring of liver lesions caused by *Ascaris suum* larvae: A longitudinal study conducted in northern Italy. *Preventive Veterinary Medicine*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2025.106553>
- Allievi, C., Valleri, M., Zanzani, S. A., Zanon, A., Mortarino, M., y Manfredi, M. T. (2024). Epidemiology and distribution of gastrointestinal parasites in fattening pig farms in northern Italy. *Parasitology Research*, 123. <https://doi.org/10.1007/s00436-024-08320-z>
- Bawm, S., Htun, L. L., Chel, H. M., Khaing, Y., Hmoon, M. M., Thein, S. S., Win, S. Y., Soe, N. C., Thaw, Y. N., Hayashi, N., Win, M. M., Nonaka, N., Katakura, K., y Nakao, R. (2024). A survey of gastrointestinal helminth infestation in smallholder backyard pigs and the first molecular identification of the two zoonotic helminths *Ascaris suum* and *Trichuris suis* in Myanmar. *BMC Veterinary Research*, 20. <https://doi.org/10.1186/s12917-024-03998-w>
- Boeira, V. L., Bezagio, R. C., Carvalho, M. S. de, Gandra, R. F., Abreu, A. P. de, Massara, C. L., Colli, C. M., y Ornelas Toledo, M. J. de O. (2025). Hybrid and/or mixed infection by pig and human *Ascaris* in a Guarani indigenous village in southern Brazil. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 19(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0012271>
- Boes, J., Kanora, A., Havn, K. T., Christiansen, S., Vestergaard-Nielsen, K., Jacobs, J., y Alban, L. (2010). Effect of *Ascaris suum* infection on performance of fattening pigs. *Veterinary Parasitology*, 172(3-4), 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2010.05.007>
- Elizalde-Velázquez, L. E., Schlosser-Brandenburg, J., Laubschat, A., Oser, L., Kundik, A., Adjah, J., Groenhagen, S., Köhl, A. A., Rausch, S., y Hartmann, S. (2024). Th2-biased immune responses to body migrating *Ascaris* larvae in primary infection are associated with pathology but not protection. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65281-0>
- Fausto, M. C., Oliveira, I. de C., Fausto, G. C., Carvalho, L. M. de, Valente, F. L., Campos, A. K., y Araújo, J. V. de. (2015). *Ascaris suum* in pigs of the Zona da Mata, Minas Gerais State, Brazil. *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária*, 24(3), 375-378. <https://doi.org/10.1590/S1984-29612015047>
- Fischer, H. R. M., Krücken, J., Fiedler, S., Duckwitz, V., Nienhoff, H., Steuber, S., Daher, R., y von Samson-Himmelstjerna, G. (2024). Gastrointestinal nematodes in German outdoor-reared pigs based on faecal egg count and next-generation sequencing nemabiome data. *Porcine Health Management*, 10. <https://doi.org/10.1186/s40813-024-00384-8>
- Ilić, T., Becskei, Z., Tasić, A., y Dimitrijević, S. (2013). Follow-up study of prevalence and control of ascariasis in swine populations in Serbia. *Acta Parasitologica*, 58(3), 278-283. <https://doi.org/10.2478/s11686-013-0132-z>
- Joachim, A., Winkler, C., Rucizka, U., Ladinig, A., Koch, M., Tichy, A., y Schwarz, L. (2021). Comparison of different detection methods for *Ascaris suum* infection on Austrian swine farms. *Porcine Health Management*, 7. <https://doi.org/10.1186/s40813-021-00236-9>

- Jones, B. P., Kozel, K., Alonte, A. J. I., Llanes, K. K. R., Juhász, A., Chaudhry, U., Roose, S., Geldhof, P., Belizario, V. Y., Nejsun, P., Stothard, J. R., LaCourse, E. J., van Vliet, A. H. M., Paller, V. G. V., y Betson, M. (2024). Worldwide absence of canonical benzimidazole resistance-associated mutations within β -tubulin genes from *Ascaris*. *Parasites & Vectors*, 17. <https://doi.org/10.1186/s13071-024-06306-5>
- Katakam, K. K., Thamsborg, S. M., Dalsgaard, A., Kyvsgaard, N. C., y Mejer, H. (2016). Environmental contamination and transmission of *Ascaris suum* in Danish organic pig farms. *Parasites & Vectors*, 9. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1349-0>
- Koehler, S., Springer, A., Issel, N., Klinger, S., Strube, C., y Breves, G. (2021). Changes in porcine nutrient transport physiology in response to *Ascaris suum* infection. *Parasites & Vectors*, 14. <https://doi.org/10.1186/s13071-021-05029-1>
- Li, Y. Z., Hernandez, A. D., Major, S., y Carr, R. (2022). Occurrence of intestinal parasites and its impact on growth performance and carcass traits of pigs raised under near-organic conditions. *Frontiers in Veterinary Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.911561>
- Lindgren, K., Gunnarsson, S., Höglund, J., Lindahl, C., y Roepstorff, A. (2020). Nematode parasite eggs in pasture soils and pigs on organic farms in Sweden. *Organic Agriculture*, 10, 289-300. <https://doi.org/10.1007/s13165-019-00273-3>
- Martínez-Pérez, J. M., Vandekerckhove, E., Vlamincck, J., Geldhof, P., y Martínez-Valladares, M. (2017). Serological detection of *Ascaris suum* at fattening pig farms is linked with performance and management indices. *Veterinary Parasitology*, 248, 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.10.009>
- Massaglia, S., Merlino, V. M., Borra, D., Verduna, T., Renna, M., y Rambozzi, L. (2018). Impact of swine ascariasis on feeding costs and revenues in farms associated with the Italian PDOs dry-cured hams industry. *Quality - Access to Success*, 19, 146-154.
- Mendes, Â. J., Ribeiro, A. I., Severo, M., y Niza-Ribeiro, J. (2017). A multilevel study of the environmental determinants of swine ascariasis in England. *Preventive Veterinary Medicine*, 148, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.09.012>
- Musimbi, Z. D., Laubschat, A., Oser, L., Mugo, R. M., Hempel, B.-F., Höfler, P., Schlosser-Brandenburg, J., Midha, A., Rausch, S., y Hartmann, S. (2025). Larval ascariasis induces prominent IgA and IgG1/2 antibody responses against adult *Ascaris* excretory-secretory antigens in pigs. *Frontiers in Immunology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1606128>
- Oba, P., Dione, M., Mwiine, F. N., Wieland, B., Erume, J., y Ouma, E. (2023). Economic losses associated with respiratory and helminth infections in domestic pigs in Lira district, Northern Uganda. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1198461>
- Oser, L., Midha, A., Schlosser-Brandenburg, J., Rausch, S., Mugo, R. M., Kundik, A., Elizalde-Velázquez, L. E., Adjah, J., Musimbi, Z. D., Klopffleisch, R., Helm, C. S., von Samson-Himmelstjerna, G., Hartmann, S., y Ebner, F. (2024). *Ascaris suum* infection in juvenile pigs elicits a local Th2 response in a setting of ongoing Th1 expansion. *Frontiers in Immunology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1396446>
- Palma, A., Matamoros, G., Escobar, D., Sánchez, A. L., y Fontecha, G. (2020). Absence of mutations associated with resistance to benzimidazole in the beta-tubulin gene of *Ascaris suum*. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 53. <https://doi.org/10.1590/0037-8682-0155-2019>
- Roepstorff, A., Mejer, H., Nejsun, P., y Thamsborg, S. M. (2011). Helminth parasites in pigs: New challenges in pig production and current research highlights. *Veterinary Parasitology*, 180(1-2), 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2011.05.029>
- Senanayake, N. S., Boyle, L., O'Driscoll, K., Menant, O., y Butler, F. (2025). Effects of season, age and parasite management practices on gastro-intestinal parasites in pigs kept outdoors in Ireland. *Irish Veterinary Journal*, 78. <https://doi.org/10.1186/s13620-025-00297-0>
- Tassis, P., Symeonidou, I., Gelasakis, A. I., Kargaridis, M., Aretis, G., Arsenopoulos, K. V., Tzika, E., y Papadopoulos, E. (2022). Serological assessment of *Ascaris suum* exposure in Greek pig farms and associated risk factors including *Lawsonia intracellularis*. *Pathogens*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/pathogens11090959>
- Vandekerckhove, E., Vlamincck, J., del Pozo Sacristán, R., y Geldhof, P. (2019). Effect of strategic deworming on *Ascaris suum* exposure and technical performance parameters in fattening pigs. *Veterinary Parasitology*, 268, 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2019.03.006>
- Vargas-Hidalgo, J. S., Pisuña-Lluglluna, E. N., y Brito-Torres, J. G. (2024). Revisión bibliográfica sobre la prevalencia de parásitos gastrointestinales en cerdos destinados al faenamiento en Ecuador. *Revista Multidisciplinaria Perspectivas Investigativas*, 4(especial), 166-174. <https://doi.org/10.62574/rmpi.v4iespecial.121>
- Vismarra, A., Lenti, A., Genchi, M., Kramer, L., y Geldhof, P. (2023). Seroprevalence of *Ascaris suum* compared to milk spot prevalence at slaughter in Italian fattening pigs. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2022.100828>

- Vlaminck, J., Masure, D., Wang, T., Nejsum, P., Hokke, C. H., y Geldhof, P. (2016). A phosphorylcholine-containing glycolipid-like antigen present on the surface of infective stage larvae of *Ascaris* spp. is a major antibody target in infected pigs and humans. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 10(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005166>
- Zheng, Y., Xie, Y., Geldhof, P., Vlaminck, J., Ma, G., Gasser, R. B., y Wang, T. (2020). High anti-*Ascaris* seroprevalence in fattening pigs in Sichuan, China, calls for improved management strategies. *Parasites & Vectors*, 13. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-3935-4>



Identificación de microplásticos en agua y sedimentos del río Casacay, cantón Pasaje, provincia de El Oro

Identification of microplastics in water and sediments of the Casacay river, Pasaje canton, El Oro province

Gabriela Mishel Jimenez Cueva, Fanny Daniela Godoy Yunga, Alex Dumany Luna Florin, Juan Gabriel Paredes Moran

Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Autor de correspondencia: adluna@utmachala.edu.ec

Recibido: 27/10/2025. Aceptado: 13/02/2026.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

La contaminación por microplásticos en el agua dulce ha supuesto una grave amenaza para el medio acuático. Se investigó los microplásticos presentes en agua y sedimentos de la microcuenca del río Casacay, con el objetivo de evaluar la contaminación acuática. Se seleccionaron muestreos representativos en cuatro zonas: natural, agrícola, turística y urbana, con cuatro repeticiones en cada punto de muestreo. Las muestras se recolectaron durante la temporada lluviosa del año 2025. La metodología empleada incluyó la filtración de agua y la extracción de microplásticos en los sedimentos mediante solución salina. Los resultados mostraron una mayor concentración de microplásticos en las zonas urbanas y turísticas, especialmente fibras, influyendo significativamente las actividades antrópicas. Este estudio evidenció que los sedimentos funcionan como reservorios de microplásticos, en el que predominan las fibras, donde se evidenciaron resultados de hasta 75 unidades, mientras que, en agua, se evidenció una mayor cantidad de microplásticos con una cantidad de 100 unidades.

Palabras clave: Actividades humanas, bioacumulación, contaminación fluvial, fibra sintética, contaminación, polímeros sintéticos.

Abstract

Microplastics pollution in freshwater has posed a serious threat to aquatic environment. This study investigated the presence of microplastics in water and sediments of the Casacay River micro-basin to assess aquatic pollution. Representative samples were selected from four zones: natural, agriculture, tourist, and urban, with four replicates at each sampling point. Samples were collected during the rainy season in 2025. The methodology employed included water filtration and microplastic extraction from sediments using saline solution. The results showed a higher concentration of microplastics in urban and tourist areas, particularly fibers, with human activities significantly influencing this concentration. This study demonstrated that sediments act as reservoirs for microplastics, with fibers predominating and up to 75 units found in sediment samples. In contrast, water samples showed a higher quantity of microplastics, with up to 100 units found.

Keywords: Human activities, bioaccumulation, river pollution, synthetic fiber, pollution, synthetic polymers.

Introducción

Los microplásticos se han convertido en una fuente importante de contaminación global debido a sus altas concentraciones y su capacidad de interactuar con el ambiente (Kumkar *et al.*, 2021; Kushwaha *et al.*, 2024). La causa fundamental es la gestión inadecuada de los residuos urbanos, prácticas industriales inapropiadas y el uso indiscriminado de plásticos debido a su tamaño menor a 5 mm de longitud (Fayshal, 2024; Stapleton y Hai, 2023). Los microplásticos primarios son de forma de fragmentos, pellets y microperlas que provienen del procesamiento industrial de plásticos de la cosmética y limpieza, de partículas de resina y de materias primas industriales, cuyas fuentes son telas, bolsas, boyas, flotadores (Cole *et al.*, 2013; Turner *et al.*, 2019 y Bayo *et al.*, 2020).

Los ríos desempeñan un papel fundamental como principales conductores del transporte de plásticos hacia los océanos (Meijer *et al.*, 2021). Se estima que anualmente muchos ríos pueden transportar y desplazan billones de piezas de este material polimérico, con un peso superior a un cuarto de millón de toneladas, lo que representa el 80 % de la contaminación marina (Kye *et al.*, 2023; Rico *et al.*, 2023). Esta carga plástica puede permanecer en los lechos y sedimentos de los ríos durante años, lo que implica un reservorio temporal y un reto para la gestión ambiental (González-Curbelo *et al.*, 2025).

Los microplásticos se han convertido en un contaminante omnipresente y alarmante, que se infiltra en cuerpos de agua y entornos de todo el mundo (Dick Vethaak y Legler, 2021;

Lillo *et al.*, 2025; Piskula y Astel, 2022; Wu *et al.*, 2025). En Ecuador, la intensa presión humana sobre los cuerpos de agua ha aumentado el riesgo de contaminación por desechos sólidos, incluidos plásticos, especialmente en las áreas donde se llevan a cabo actividades agrícolas, urbanas e industriales al mismo tiempo (De-la-Torre *et al.*, 2020; Jin *et al.*, 2025). La microcuenca del río Casacay, se encuentra ubicada en el cantón Pasaje, provincia de El Oro, está resalta como un sistema fluvial con notable relevancia ecológica y socioeconómica; sin embargo, hasta la actualidad carece de registros relacionados con la posible contaminación por microplásticos.

El objetivo principal de este artículo es identificar la presencia de microplásticos en el agua y en los sedimentos de la Subcuenca baja del río Casacay.

Materiales y métodos

Área de estudio

En la Figura 1 observamos el área de estudio ubicado en la parte media y baja de la Subcuenca Casacay, en el cantón Pasaje, provincia de El Oro, al suroeste de Ecuador. La cual se sitúa en una región caracterizada por un clima tropical húmedo, con temperaturas cálidas a lo largo del año y una alta humedad relativa (Acosta-Coley *et al.*, 2019). Respecto a la altitud, la cuenca baja se encuentra entre 100 y 300 metros, donde se observan temperaturas promedio que oscilan entre 20 °C y 28 °C (Rico *et al.*, 2023). Se escogieron cuatro puntos de muestreo a lo largo del cauce principal, considerando la accesibilidad y representatividad de distintas escalas de impacto antrópico.



Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio y distribución de puntos de muestreo

Muestreo y recolección:**Tabla 1. Puntos de muestreo**

Descripción	Latitud (S)	Longitud (O)
Zona natural	3° 37' 54.6" S	79° 37' 50.1" O
Zona agrícola	3° 37' 51.4" S	79° 37' 57.9" O
Zona turística	3° 37' 36.5" S	79° 38' 36.0" O
Zona urbana	3° 37' 28.1" S	79° 38' 46.6" O

Para la recolección de muestras de agua se utilizó el protocolo para la planificación, muestreo, análisis e identificación de microplásticos en río (León y Serrano, 2019). Se realizaron cuatro repeticiones de 10 minutos por punto de muestreo con un intervalo de 15 minutos entre cada toma de muestra. En el caso de la recolección de sedimentos, en cada punto se tomaron cuatro muestras superficiales (0-5 cm de profundidad), utilizando guantes de nitrilo y materiales plásticos para evitar la contaminación (Maskrey, 1993). Las muestras fueron recolectadas durante la estación lluviosa, del 21 de marzo al 21 de mayo de 2025.

Preservación de muestras

Para el agua, se recolectaron muestras de 100 ml en un frasco de plástico por cada punto, previamente lavados con el agua de la zona de muestreo tres veces (León y Serrano, 2019). Según lo descrito por Maskrey (1993), en cuanto a sedimentos se extrajeron muestras de 100 g por punto, utilizando una espátula de plástico, y se almacenaron en frascos de plástico, las cuales fueron transportadas en cajas térmicas al laboratorio de Biodiversidad de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Machala.

Procesamiento de muestras**Muestras de agua**

En el laboratorio, se lavó previamente con agua destilada el embudo y el vaso de precipitación utilizado como recolector de agua, con ayuda de pinzas quirúrgicas se puso un papel de filtro de nitrato de celulosa, vertiendo una cantidad de 20 ml de muestra en el embudo. Al acabar de filtrar, se sostuvo el filtro con pinzas quirúrgicas y se introdujo en la caja petri correspondiente (León y Serrano, 2019; Maskrey, 1993). Posteriormente, se colocaron las cajas petri dentro del horno estufa Bektron 101 – 1AB a una temperatura de 60 °C durante 2.880 minutos en la cámara de secado.

Una vez secas las muestras, se procedió a identificar los microplásticos con ayuda del estereomicroscopio Q170-T Trinocular de alta precisión (*Better Scientific*).

Muestras de sedimentos

Se colocaron las muestras de sedimentos en envases de aluminio, los cuales se metieron al horno estufa Bektron 101 – 1AB por 4.320 min, con una temperatura de 60 °C. Tras la etapa de secado, se procedió a la trituración y tamizado de los sedimentos.

Seguido se preparó 150 gramos de cloruro de sodio (NaCl) pesándolo con una balanza analítica Bektron FA2204N. Luego, se midieron 500 ml de agua destilada con una probeta de 1 litro. Ambos componentes se incorporaron en un vaso de precipitación previamente marcado. Se empleó un equipo de agitación mecánica Bektron - HSC – 19 T para realizar una agitación constante durante 10 minutos, con una temperatura de 25 °C y una velocidad de 800 rpm.

Una vez que la solución fue uniforme, se selló el vaso de precipitación con papel aluminio y se dejó reposar durante 1 hora. Esta solución salina nos ayuda a que los microplásticos presentes en los sedimentos floten para poder identificarlos más adelante.

Se pesaron 20 gramos de sedimentos, utilizando la balanza analítica calibrada Bektron FA2204N después de su secado de 4.320 min. Estos 20 gramos fueron transferidos a un recipiente de precipitación. Para aislar y concentrar los microplásticos presentes en las muestras, se añadió 100 ml de solución salina (NaCl) y agitamos durante 15 minutos en el agitador mecánico Bektron HSC – 19 T. Después se cubrió el recipiente con papel aluminio, lo sellamos herméticamente y lo dejamos reposar a temperatura ambiente durante 48 horas.

Para llevar a cabo la extracción de microplásticos, se utilizó un embudo con papel filtro de nitrato de celulosa y un vaso de precipitación como recolector de agua. Posteriormente, se filtraron las muestras utilizando pinzas quirúrgicas para tomar el filtro y colocarlas en las cajas petri correspondientes. Introducimos las cajas etiquetadas en el horno estufa Bektron 101 – 1AB por 2.880 min a 60 °C.

Identificación de microplásticos:

Se identificaron los microplásticos bajo el estereomicroscopio Q170-T Trinocular de alta precisión. Esto permitió distinguir las partículas microplásticas a partir de su morfología. Durante el proceso de identificación, las partículas fueron clasificadas en función de su forma como fibras, fragmentos y películas (León y Serrano, 2019).

El filtro de nitrato de celulosa contenido en la caja petri se coloca bajo la lupa estereoscópica de microplásticos para poder observar con facilidad los microplásticos que no se ven a simple vista. Se delimitan claramente un inicio y un final en el papel filtro, observando cada sección de forma sistemática.

Durante el análisis, se identificaron los seis tipos de microplásticos: fibras, fragmentos, esferas, películas, esponjas y gomas, para asegurar una correcta identificación, se descartó previamente la presencia de materiales no plásticos, como partículas minerales (rocas), restos de animales (individuos o partes de rotíferos, moluscos, crustáceos, escamas de peces) o vegetales (individuos o colonias de algas). Los microplásticos detectados fueron registrados en una base de datos previamente organizada por puntos de muestreo, con el fin de determinar las zonas del río con mayor concentración de contaminantes (León y Serrano, 2019).

Resultados

La Tabla 2 evidencia una variación en la distribución de microplásticos dentro de la microcuenca evaluada, la cual parece estar fuertemente influenciada por el grado de intervención antropogénica y las características físicas de cada sitio.

En la zona natural existe una presencia baja de microplásticos, lo que se ajusta con lo evidenciado por Chi *et al.* (2023) quienes identificaron una menor cantidad de microplásticos en zonas fluviales con vegetación densa y limitada urbanización, relacionándolo al efecto de filtrado natural y la escasa actividad humana.

A diferencia de la zona agrícola el cual muestra una mayor

acumulación de fibras y presencia puntual de fragmentos, este patrón refleja el impacto de la actividad humana observada en la zona. Las fuentes urbanas, especialmente el mal tratamiento de aguas residuales, son responsables de los factores de crecimiento de los microplásticos en cuerpos de agua fluviales, particularmente fibras y fragmentos de polímeros (Yakovlev y Puchkov, 2020).

En la zona turística se detectaron 21 unidades de fibras por muestra, acompañadas por 2 unidades pequeñas de films y 1 unidad de fragmentos. En la zona urbana, los valores de las fibras llegaron a niveles superiores, con registros de 18 y 33 unidades por muestra, sin tener la presencia de otros tipos de microplásticos. Este patrón indica una posible concentración localizada de fibras en esta sección de la microcuenca.

Tabla 2. Tipos de Microplásticos presentes en agua

Tipo de microplásticos en agua						
Punto de muestreo	Fragmentos	Films	Pelets	Gránulos	Fibras	Espumas
Zona natural	0	1	0	0	0	1
	0	0	0	0	2	0
	0	2	0	0	2	0
	0	2	0	0	3	0
Zona agrícola	0	0	0	0	5	0
	0	0	0	0	3	0
	0	0	0	0	7	0
	1	0	0	0	4	0
Zona turística	0	2	0	0	17	0
	0	1	0	0	2	0
	0	2	0	0	11	0
	1	0	0	0	21	0
Zona urbana	0	0	0	0	33	0
	0	1	0	0	26	0
	0	0	0	0	18	0
	0	0	0	0	22	0

La Figura 2 refleja el diagrama de cajas en el cual se visualiza la distribución de los conteos de microplásticos en los distintos puntos de muestreo de la microcuenca. En cada punto, se observa la mediana, el rango intercuartílico y la dispersión de los datos, lo que permite señalar variaciones en la cantidad de microplásticos detectados por muestra. Aunque

algunos puntos presentan mayor variabilidad que otros, las medianas son visualmente similares entre sí, las cuales no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los puntos de muestreo ($p > 0,05$).

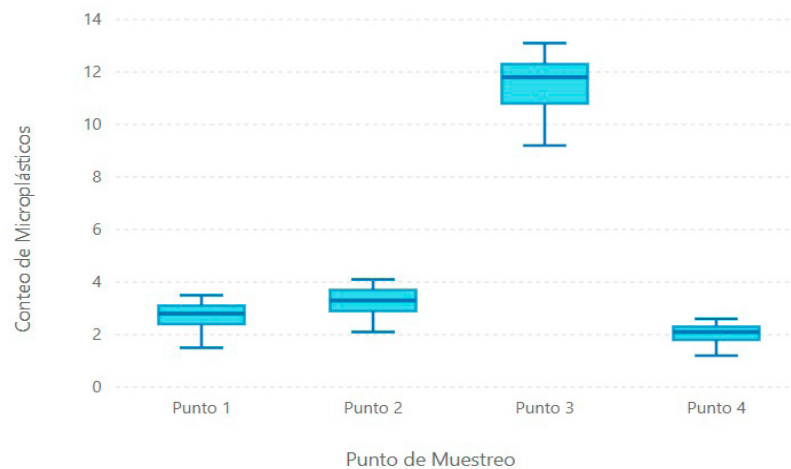


Figura 2. Diagrama de cajas de conteo de microplásticos en agua por punto de muestreo

Tabla 3. Tipos de Microplásticos presentes en sedimentos

Registro de microplásticos en sedimentos						
Puntos de muestreo	Fragmentos	Films	Pelets	Gránulos	Fibras	Espumas
Zona natural	0	0	0	0	18	0
	0	0	0	0	33	0
	0	0	0	0	9	0
	0	1	0	0	6	0
Zona agrícola	0	0	0	0	12	0
	0	0	0	0	19	0
	0	0	0	0	32	0
	0	0	0	0	12	0
Zona turística	0	0	0	0	14	0
	1	0	0	0	6	0
	0	0	0	0	6	0
	0	0	0	0	19	0
Zona urbana	0	0	0	0	11	0
	0	0	0	0	17	0
	0	0	0	0	23	0
	0	0	0	0	16	0

La Tabla 3 muestra el conteo de microplásticos encontrados, con cuatro réplicas por cada punto de muestreo. Estos residuos identificados se clasifican en seis categorías: fragmentos, films, pelets, gránulos, fibras y espumas, aunque en la práctica, la mayoría de los registros se concentran en las fibras. En la zona natural, los conteos de fibras varían entre 6 y 33 unidades, corresponde a la única categoría detectada en la mayor parte de las réplicas. Solo en la réplica 4 se identificó

un film, lo que elevó el total de esa muestra a 7 microplásticos.

En la zona agrícola, persiste la presencia específica de fibras, con valores que oscilan entre 12 y 32 unidades, sin que exista la aparición de otros tipos de microplásticos. Este patrón de contaminación por fibras podría estar relacionado con una fuente local o con una dinámica sedimentaria que contribuye a la acumulación de estas partículas. En la zona turística, la contabilización de fibras fue ligeramente más bajas

en comparación con los puntos anteriores, con un rango de 6 a 19 unidades. En la réplica 2 se identificó un fragmento, lo que llevó el total de esta muestra a 7 microplásticos. Nuevamente, las fibras son los componentes dominantes.

En la zona urbana, se observa una variación entre 11 y 23 fibras por muestra. No se encontraron otros tipos de microplásticos en esta sección de muestreo. Aunque los valores son consistentes, se observa una ligera disminución en comparación con las zonas más altas como la zona natural y agrícola.

La Figura 3 muestra la distribución del conteo total de microplásticos en sedimentos para cada uno de los cuatro puntos de muestreo. Este gráfico permite visualizar la variabilidad de los datos y detectar posibles valores atípicos o diferencias en la concentración de microplásticos entre los sitios evaluados. Se observa que todos los puntos presentan registros elevados de microplásticos, con valores que varían ampliamente entre las réplicas.

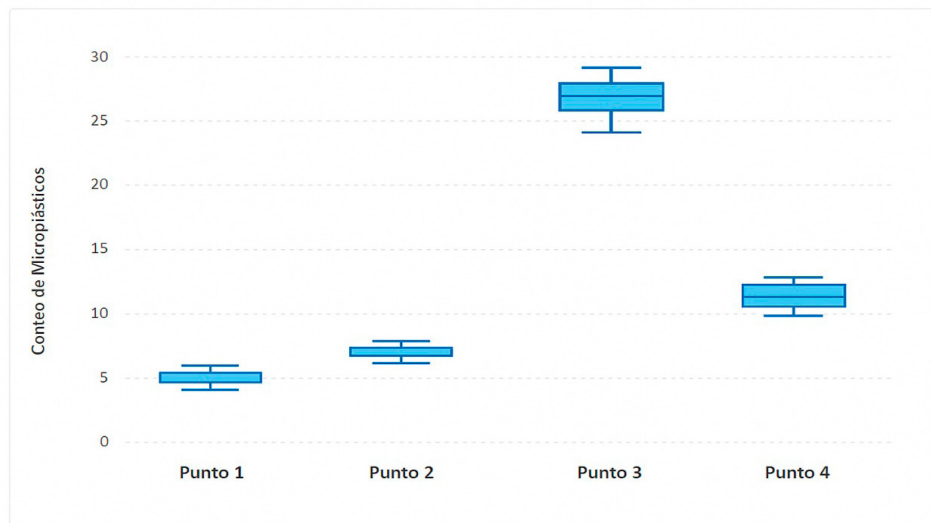


Figura 3. Diagrama de cajas de conteo de microplásticos en sedimentos por punto de muestreo

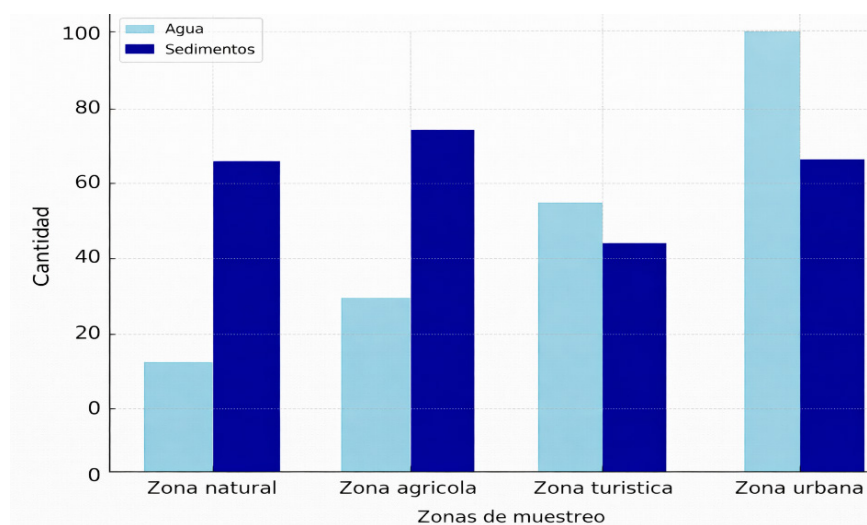


Figura 4. Gráfico de barras de comparación de agua y sedimentos

En la Figura 4 se observa una mayor concentración de microplásticos en los sedimentos, especialmente en las zonas de muestreo con valores de 67 y 75 unidades respectivamente, en comparación con el agua. Esta tendencia es coherente con estudios previos que señalan que los sedimentos fluviales intervienen como un reservorio de microplásticos, los cuales son transportados por las corrientes de agua desde las fuentes terrestres.

En cuanto a las zonas turística y urbana, aunque los niveles de los microplásticos aumentan de forma considerable, con valores de 57 y 100 unidades respectivamente, los sedimentos aun muestran concentración más alta.

Discusión

La cercanía territorial de áreas turísticas juega un papel clave en la liberación de microfibras en el agua, las actividades recreativas, como el baño y el uso de ropa de poliéster y otros materiales sintéticos, son bien conocidas por ser fuentes notables de microfibras. Según, Yakovlev y Puchkov (2020) indica que estas fibras, al ser arrastradas por el agua, se acumulan progresivamente en zonas específicas de esta microcuenca. Además, Jenner *et al.* (2022) señalaron que estas fibras sintéticas pueden actuar como vectores de contaminantes químicos, lo que podría complicar los efectos de la contaminación en el ecosistema acuático.

La variabilidad en los registros de microplásticos a través de las zonas de muestreo indican que las fuentes puntuales, como las descargas industriales o el vertido de desechos sólidos, podrían tener un rol determinante en la contaminación del agua. Los ríos urbanos por lo general evidencian valores superiores de contaminación por microplásticos; entre los puntos podrían reflejar factores como la proximidad a las fuentes de contaminación, la tasa de flujo del agua y la presencia de características que filtran o retienen estos microplásticos en el paisaje (Rahav *et al.*, 2022). La presencia de valores atípicos en las muestras de agua plantea la posibilidad de fluctuaciones temporales de contaminación o concentraciones localizadas que podrían ser causadas por fuentes transitorias.

Las cifras representan una proporción significativa de los microplásticos encontrados en los ríos, especialmente en áreas urbanas y recreativas, lo que corrobora la hipótesis de que estos plásticos son la principal fuente de contaminación en muchos cuerpos de agua (Gao *et al.*, 2024)

Además, la alta acumulación de microplásticos en los sedimentos puede tener intervenciones ecológicas graves, ya que estos contaminantes al ser ingeridos por organismos bentónicos, influyen en la alimentación de la biodiversidad acuática (Vandermeersch *et al.*, 2015). La ingesta de microplásticos por parte de las especies acuáticas en los ríos en América Latina puede producir consecuencias perjudiciales y una bioacumulación de microplásticos en el ser humano ya que es parte de la cadena alimenticia a nivel fisiológico (Fernandes *et al.*, 2022).

Conclusiones

Los resultados conseguidos del estudio corroboran que dentro de la microcuenca del río Casacay se manifiestan muestras de contaminación por microplásticos, tanto en el agua como en los sedimentos. Se sugiere implementar monitoreos frecuentes en diferentes puntos altitudinales de los ríos de Ecuador, para observar la cantidad y la diferencia de los tipos de microplásticos presentes en el agua y sedimentos, especialmente en zonas con alta intervención humana, para comprender mejor la distribución de este tipo de contaminante y desarrollar estrategias de mitigación adecuadas.

Es crucial realizar estudios adicionales sobre los efectos a largo plazo de los microplásticos en los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad de los ríos, especialmente en áreas de alta actividad humana. Además, se recomienda valorar la influencia de las características físicas de los ríos, como el flujo del agua y el tipo de sustrato, en la acumulación de microplásticos.

En las zonas urbanas y turísticas, donde las actividades humanas incrementan la concentración de estos contaminantes, los sedimentos representan un reservorio clave para los microplásticos, dado que revelan concentraciones más altas que el agua. Esto señala la necesidad de estudiar los sedimentos como un elemento esencial en los estudios de contaminación por microplásticos en ríos. Las áreas urbanas y turísticas presentan una mayor concentración de fibras sintéticas, lo que evidencia el impacto directo de las actividades humanas, como es el uso de ropa sintética lo que aporta a la liberación de material polímero al ambiente fluvial.

Referencias

- Acosta-Coley, I., Duran-Izquierdo, M., Rodriguez-Cavallo, E., Mercado-Camargo, J., Mendez-Cuadro, D., y Olivero-Verbel, J. (2019). Quantification of microplastics along the Caribbean Coastline of Colombia: Pollution profile and biological effects on *Caenorhabditis elegans*. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 574–583. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2019.06.084>
- Bayo, J., Rojo, D., Olmos, S., y López, M. (2020). Microplastic pollution on the strandline of urban and natural city beaches: The role of local activities. *International Journal of Environmental Impacts*, 3(2), 155–167. <https://doi.org/10.2495/EI-V3-N2-155-167>
- Chi, S. C., Kang, Y. N., y Huang, Y. M. (2023). Efficacy and safety profile of intravitreal dexamethasone implant versus antivascular endothelial growth factor treatment in diabetic macular edema: a systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34673-z>
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J., y Galloway, T. S. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science and*

- Technology, 47(12), 6646–6655. <https://doi.org/10.1021/es400663f>
- De-la-Torre, G. E., Dioses-Salinas, D. C., Castro, J. M., Antay, R., Fernández, N. Y., Espinoza-Morriberón, D., y Saldaña-Serrano, M. (2020). Abundance and distribution of microplastics on sandy beaches of Lima, Peru. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110877. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2019.110877>
- Dick Vethaak, A., y Legler, J. (2021). Microplastics and human health: Knowledge gaps should be addressed to ascertain the health risks of microplastics. *Science*, 371(6530), 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
- Fayshal, M. A. (2024). Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management. *Heliyon*, 10(23), e40838. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E40838>
- Fernandes, A. N., Bertoldi, C., Lara, L. Z., Stival, J., Alves, N. M., Cabrera, P. M., y Grassi, M. T. (2022). Microplastics in Latin America Ecosystems: A critical review of the current stage and research needs. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 33(4), 303–326. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20220018>
- Gao, S., Orlowski, N., Bopf, F. K., y Breuer, L. (2024). A review on microplastics in major European rivers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 11(3). <https://doi.org/10.1002/wat2.1713>
- González-Curbelo, M. Á., Cruz-Pérez, A., Gutiérrez-Bouzáin, C., y López-Mesas, M. (2025). Assessing microplastic pollution along the Caribbean coast of La Guajira, Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117511. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2024.117511>
- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., y Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of The Total Environment*, 831, 154907. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154907>
- Jin, X., Li, Z., Peñuelas, J., Sardan, J., Wu, Q., Peng, Y., Heděnc, P., Li, Z., Yuan, C., Yuan, J., Chen, Z., Zhao, Z., Wu, F., y Yue, K. (2025). Quantitative assessment on the distribution patterns of microplastics in global inland waters. *Communications Earth and Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02320-2>
- Kumkar, P., Gosavi, S. M., Verma, C. R., Pise, M., y Kalous, L. (2021). Big eyes can't see microplastics: Feeding selectivity and eco-morphological adaptations in oral cavity affect microplastic uptake in mud-dwelling amphibious mudskipper fish. *Science of The Total Environment*, 786, 147445. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.147445>
- Kushwaha, M., Shankar, S., Goel, D., Singh, S., Rahul, J., Rachna, K., y Singh, J. (2024). Microplastics pollution in the marine environment: A review of sources, impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 209, 117109. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2024.117109>
- Kye, H., Kim, J., Ju, S., Lee, J., Lim, C., y Yoon, Y. (2023). Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14359>
- León, D., y Serrano, L. (2019). Protocolo para la planificación, muestreo, análisis de identificación de microplásticos en ríos. https://hombreyterritorio.org/protocolo-de-muestreo-e-identificacion-de-microplasticos/?utm_source=
- Lillo, P. M., Udagedara, S., Williamson, R., y Gorman, D. (2025). Cross-shore microplastic accumulation on Sri Lanka's west coast one year after the Catastrophic x-press pearl pollution event. *Microplastics*, 4(3), 37. <https://doi.org/10.3390/microplastics4030037>
- Maskrey, A. (1993). *Los Desastres No Son Naturales*. <https://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/LosDesastresNoSonNaturales-1.0.0.pdf>
- Meijer, L. J. J., Van Emmerik, T., Van Der Ent, R., Schmidt, C., y Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Sci. Adv*, 7(18). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>
- Piskula, P., y Astel, A. M. (2022). Microplastics occurrence in two mountainous rivers in the lowland area—a case study of the Central Pomeranian Region, Poland. *Microplastics*, 1(1), 167–185. <https://doi.org/10.3390/microplastics1010011>
- Rahav, E., Belkin, N., Nnebuo, O., Sisma-Ventura, G., Guy-Haim, T., Sharon-Gojman, R., Geisler, E., y Bar-Zeev, E. (2022). Jellyfish swarm impair the pretreatment efficiency and membrane performance of seawater reverse osmosis desalination. *Water Research*, 215, 118231. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.118231>
- Rico, A., Redondo-Hasselerharm, P. E., Vighi, M., Waichman, A. V., Nunes, G. S. de S., de Oliveira, R., Singdahl-Larsen, C., Hurley, R., Nizzetto, L., y Schell, T. (2023). Large-scale monitoring and risk assessment of microplastics in the Amazon River. *Water Research*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119707>
- Stapleton, M. J., y Hai, F. I. (2023). Microplastics as an emerging contaminant of concern to our environment: a brief overview of the sources and implications. *Bioengineered*, 14(1), 2244754. <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2244754>
- Turner, A., Wallerstein, C., y Arnold, R. (2019). Identification, origin and characteristics of bio-bead microplastics from beaches in western Europe. *Science of the Total Environment*, 664, 938–947. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.281>
- Vandermeersch, G., Van Cauwenberghe, L., Janssen, C. R., Marques, A., Granby, K., Fait, G., Kotterman, M. J. J.,

- Diogène, J., Bekaert, K., Robbens, J., y Devriese, L. (2015). A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms. *Environmental Research*, 143, 46–55. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2015.07.016>
- Wu, Z., Wang, J., Yu, S., Sun, Q., y Han, Y. (2025). Microplastic pollution in China's aquatic systems: Spatial distribution, transport pathways, and controlling strategies. *Microplastics*, 4(3), 41. <https://doi.org/10.3390/microplastics4030041>
- Yakovlev, E., y Puchkov, A. (2020). Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111571. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2020.111571>



Valor económico y ambiental de los servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con café en Latinoamérica

Economic and environmental value of ecosystem services in agroforestry systems with coffee in Latin America

Peter Robert Vera Maldonado¹, José Newthon Pico Mendoza², Elvira Rodríguez Ríos²

¹*Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí - Manuel Félix López, Ecuador*

²*Universidad Técnica de Manabí, Ecuador*

Autor de correspondencia: prvera@espam.edu.ec

Recibido: 13/02/2026. Aceptado: 12/06/2026.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

La investigación analiza la valoración económica de los servicios ecosistémicos generados por los sistemas agroforestales con café en Latinoamérica, reconociendo su importancia como alternativa productiva sostenible frente a los sistemas intensivos los cuales han provocado pérdida de biodiversidad, degradación del suelo y aumento de emisiones. El estudio tuvo como objetivo general examinar, a partir de la literatura científica, el valor económico y ambiental de servicios como el secuestro de carbono, la conservación de la biodiversidad, la polinización, la regulación hídrica y la conservación de suelos, y su contribución al desarrollo rural sostenible. La metodología consistió en una revisión sistemática de la literatura de artículos científicos indexados en bases de datos, priorizando estudios empíricos de países productores de café: Perú, Colombia, Brasil, México, Costa Rica, Ecuador y Nicaragua. Los sistemas agroforestales, en comparación con otros tipos de sistemas de producción, ganan en almacenamiento de carbono en la biomasa y en el suelo, aumentan el carbono orgánico del suelo y proveen hábitat a la biodiversidad, sin afectar la productividad de los cultivos. Los estudios revisados describen los beneficios económicos de la polinización y el pago por servicios medioambientales, lo que refuerza la sostenibilidad financiera de estos sistemas. Los sistemas agroforestales con café, en la gran mayoría de los casos, representan una oportunidad para la práctica de la producción, la conservación de la naturaleza y la apreciación de los servicios medioambientales que proporcionan los ecosistemas. Esto justifica su inclusión en los sistemas de políticas públicas y en los planes de desarrollo rural sostenible.

Palabras clave: secuestro de carbono, biodiversidad, sostenibilidad ambiental, producción agrícola, valoración económica.

Abstract

This research analyzes the economic valuation of ecosystem services generated by agroforestry systems with coffee in Latin America, recognizing their importance as a sustainable production alternative to intensive, which have led to biodiversity loss, soil degradation, and increased emissions. The study's general objective was to examine, based on scientific literature, the economic and environmental value of services such as carbon sequestration, biodiversity conservation, pollination, water regulation, and soil conservation, and their contribution to sustainable rural development. The methodology consisted of a systematic literature review of scientific articles indexed in databases, prioritizing empirical studies from coffee-producing countries: Peru, Colombia, Brazil, Mexico, Costa Rica, Ecuador, and Nicaragua. Agroforestry systems, compared to other types of production systems, increase carbon storage in biomass and soil, enhance soil organic carbon, and provide habitat for biodiversity without affecting crop productivity. The reviewed studies describe the economic benefits of pollination and payments for environmental services, reinforcing the financial sustainability of these systems. Agroforestry systems with coffee, in the vast majority of cases, represent an opportunity for production practices, nature conservation, and appreciation of the environmental services provided by ecosystems. This justifies their inclusion in public policy systems and sustainable rural development plans.

Keywords: carbon sequestration, biodiversity, environmental sustainability, agricultural production, economic valuation.

Introducción

El café (*Coffea arabica* L.) ocupa una posición dominante entre los cultivos producidos en los trópicos, y su cultivo depende de sus condiciones ecológicas (Flores-Ortiz *et al.*, 2025). Con la intensidad moderada de la práctica agrícola, puede provocar deforestación, pérdidas de biodiversidad, degradación del suelo y un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Cerdeira *et al.*, 2020). En respuesta, los sistemas agroforestales buscan combinar la producción con la captura de carbono, regular el ciclo del agua, proteger el suelo y promover la biodiversidad, alineándose así con los objetivos de sostenibilidad (Briceño Salas y Torres, 2024).

A lo largo de la historia de la agroforestería en América Latina, los sistemas cafeteros agroforestales han formado parte del paisaje rural de algunos países de la región, particularmente Brasil, Colombia, Perú, México y Costa Rica (Ruiz *et al.*, 2020). La evidencia disponible muestra que estos sistemas, incluso en su existencia y funcionalidad, no han impactado la producción agrícola, además de conservar la biodiversidad proporcionando hábitat y sinergia entre la provisión de servicios ecosistémicos y la producción agrícola, almacenando a veces tanto o más carbono en biomasa y suelo que los sistemas de uso del suelo de igual o similar categoría (Delgado-Vargas y Franco, 2024; Vallejos-Torres *et al.*, 2024).

Salgado *et al.* (2025) afirman que, aunque existen beneficios en este sentido, en muchas partes de América Latina se siguen tomando decisiones agrícolas basándose en criterios productivos a corto plazo, favoreciendo sistemas a pleno sol. La escasa integración de los servicios ecosistémicos en la planificación económica, y la ausencia de estimaciones económicas claras de polinización, secuestro de carbono o control de erosión, limitan su reconocimiento como activos productivos y reducen los argumentos económicos para adoptar sistemas agroforestales (Jezeer *et al.*, 2019).

En respuesta a esta limitación, la valoración económica de los servicios ecosistémicos se convierte en una herramienta clave para visibilizar la verdadera contribución de los sistemas agroforestales con el café, convirtiendo los beneficios ecológicos en términos monetarios que pueden compararse con la renta agrícola tradicional (Galeana-Pizaña y Manson, 2025). Las investigaciones realizadas en América Latina muestran que servicios como la polinización pueden tener un impacto directo en la calidad del grano producido y en los ingresos del productor, mientras que, en el contexto del pago por servicios medioambientales, se han obtenido resultados positivos en la conservación del capital natural cuando se integra con asistencia técnica y acceso al mercado (Pereira Machado *et al.*, 2024). Estas contribuciones refuerzan la viabilidad económica de la sostenibilidad y apoyan su incorporación en las políticas públicas y las estrategias de desarrollo rural.

En este contexto, la actual investigación se apoya en la Teoría del Desarrollo Rural Sostenible, la cual considera a la

agricultura como una actividad económica, social y natural multifuncional, cohesionadora y preservadora del capital natural. Este enfoque se alinea con la Agenda 2030, en coherencia con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 15 (Vida de ecosistemas terrestres), particularmente en la meta 15.9 que incluye, dentro de la planificación y la contabilidad nacional, el valor de la biodiversidad. Igualmente, se sostiene el ODS 2 (Hambre cero) y el ODS 13 (Acción por el clima), al fomentar la producción de sistemas productivos resilientes que mitigan y se adaptan al cambio climático a través del secuestro de carbono y la estabilización de los agroecosistemas (Haggar *et al.*, 2021; Vallejos-Torres *et al.*, 2024).

A nivel nacional, este enfoque se integra con el actual modelo económico ecuatoriano, enmarcado dentro de los principios de Economía Social, Solidaridad y desarrollo sostenible, que enfatizan al pequeño productor, la equidad territorial y el equilibrio ecológico. Sin embargo, estas directrices coexisten con las dinámicas del mercado y las prácticas agrícolas que valoran los servicios ecosistémicos del mercado.

En este contexto, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el valor económico documentado de los servicios ecosistémicos de los sistemas agroforestales de café en la literatura científica, y qué papel juegan en la sostenibilidad productiva y ambiental del sector cafetalero?

De acuerdo con la pregunta de investigación planteada, el presente estudio se enfocó en la revisión crítica de la información científica disponible acerca de los servicios ecosistémicos generados por sistemas agroforestales de café y su contribución a la sostenibilidad ambiental y económica en América Latina.

En este sentido, el objetivo general de la investigación consiste en analizar, desde una revisión bibliográfica, la valoración económica de los servicios ecosistémicos (eco servicios) de los sistemas agroforestales con café, y su aporte a la economía rural sostenible, en el contexto de América Latina.

A continuación, se presenta el sustento teórico de la investigación, elaborado a partir de la revisión de literatura científica relacionada con los servicios ecosistémicos y su valoración económica en sistemas agroforestales con café en Latinoamérica.

La literatura científica actual coincide en que los agroforestales cafetaleros superan a los monocultivos intensivos en la provisión de servicios ecosistémicos. Estudios desarrollados en la Amazonía peruana y en el sur de Brasil evidencian que la incorporación de árboles de sombra incrementa de manera significativa el almacenamiento de carbono total, especialmente en la biomasa aérea y en el suelo, alcanzando valores comparables a los de ecosistemas forestales secundarios (Vallejos-Torres *et al.*, 2024; Zaro *et al.*, 2020). Además, la investigación realizada en Colombia sugiere que una mayor diversidad floral y estructural en los sistemas agroforestales de café está asociada con un aumento

en el carbono orgánico del suelo, lo que refuerza su potencial en la mitigación del cambio climático (Delgado-Vargas y Franco, 2024).

Desde una perspectiva ecosistémica más amplia, autores han analizado la capacidad de los sistemas agroforestales para generar sinergias entre producción agrícola y conservación ambiental. Harvey *et al.* (2021) en una revisión regional, señalan que los cafetales agroforestales son importantes hábitats para la biodiversidad y corredores en paisajes fragmentados. En la misma línea, Cerda *et al.* (2020) demuestran que sistemas con sombra moderada pueden mantener rendimientos productivos estables y a la vez ofrecer múltiples servicios ecosistémicos, como control de enfermedades, conservación de biodiversidad y regulación de procesos ecológicos, siendo compatibles la producción y la sostenibilidad si se gestionan adecuadamente.

La economía reconoce que, para facilitar la incorporación de beneficios de tipo ecológico en la toma de decisiones, es necesario estimar dichos beneficios en términos monetarios (De Leijster *et al.*, 2021). El servicio de polinización en cafetales, el cual muestra limitaciones productivas en la calidad del grano y en los ingresos que obtiene el productor evidenciando que los servicios ecosistémicos pueden ser considerados como activos productivos (Jezeer *et al.*, 2019; Pereira Machado *et al.*, 2024).

Además, casos de pagos por servicios ambientales en países como Costa Rica demuestran que, cuando se combinan con asistencia técnica y acceso a mercados diferenciados, contribuyen a la conservación del capital natural y la sostenibilidad económica de los sistemas agroforestales (Salgado *et al.* 2025).

Materiales y métodos

Enfoque y tipo de estudio

Consistió en una revisión bibliográfica sistemática, enfocada en la valoración económica de servicios ecosistémicos de sistemas agroforestales con café en Latinoamérica. Este tipo de estudio permitió integrar y contrastar evidencia científica existente, sin manipulación de variables, con el fin de comprender tendencias, aportes y limitaciones documentadas en la literatura especializada.

La revisión sistemática permitió comparar los principales servicios ecosistémicos secuestro de carbono, biodiversidad, polinización, regulación hídrica y conservación del suelo en términos biofísicos y económicos. Como indican Guevara Alban *et al.* (2020), la revisión sistemática integra resultados dispersos y fortalece la fundamentación teórica de una investigación, lo cual fue apropiado para los propósitos del estudio.

Fuentes de información y selección de artículos

La búsqueda y selección de información se llevó a cabo a partir de artículos científicos especializados publicados entre 2017 y 2025, recuperados de bases de datos científicas de alto impacto

como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Frontiers, así como de repositorios universitarios y literatura científica regional. Estas fuentes fueron seleccionadas debido a su rigor metodológico, revisión por pares y cobertura temática relacionada con la agroforestería, los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad ambiental.

Se emplearon palabras clave y ecuaciones booleanas en español e inglés, entre ellas: *coffee agroforestry*, *ecosystem services*, *economic valuation*, *carbon sequestration*, *biodiversity*, *payments for ecosystem services*, *agroforestería cafetalera* y *servicios ecosistémicos*. Los criterios de inclusión consideraron estudios empíricos, revisiones sistemáticas y metaanálisis que abordaran sistemas agroforestales con café y reportaran evidencia cuantitativa o cualitativa verificable. Se excluyeron documentos duplicados, literatura no arbitrada y estudios que no guardaban relación directa con los objetivos de la investigación.

La estrategia de búsqueda se desarrolló mediante la combinación de palabras clave y operadores booleanos AND y OR para ampliar la cobertura de la búsqueda y garantizar la recuperación de estudios relevantes. La ecuación de búsqueda general utilizada fue la siguiente:

("coffee agroforestry" OR "agroforestería cafetalera") AND ("ecosystem services" OR "servicios ecosistémicos") AND ("economic valuation" OR "valoración económica") AND ("carbon sequestration" OR biodiversity OR pollination OR "water regulation")

Esta ecuación fue adaptada a las características y sintaxis específicas de cada base de datos consultada con el propósito de identificar investigaciones relacionadas con la valoración económica y ambiental de los servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con café en Latinoamérica.

Durante la fase inicial se identificaron 38 documentos potencialmente relacionados con la temática de investigación. Posteriormente, se efectuó un proceso de revisión y depuración, mediante el cual se excluyeron 13 documentos por presentar duplicidad, ausencia de información científica verificable, falta de relación directa con los objetivos del estudio o por corresponder a literatura no arbitrada. Como resultado del proceso de selección y elegibilidad, se incluyeron 25 publicaciones científicas para el análisis final.

Con el propósito de garantizar la transparencia y reproducibilidad del proceso de revisión sistemática, la Figura 1 presenta el procedimiento de identificación, selección, evaluación de elegibilidad e inclusión de los estudios analizados, siguiendo los lineamientos metodológicos de la declaración PRISMA. Este proceso permitió depurar la literatura recuperada y seleccionar las publicaciones científicas que cumplieron con los criterios establecidos para el estudio.

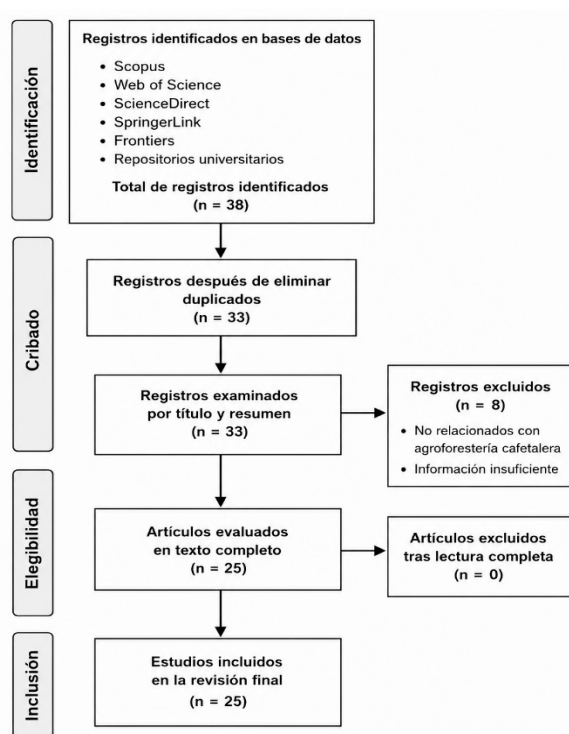


Figura X. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de búsqueda, selección y elegibilidad de artículos científicos.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos según la metodología PRISMA

Nota. Elaboración propia con base en el proceso de búsqueda, selección, elegibilidad e inclusión de artículos científicos utilizados en la revisión sistemática.

Método de análisis de la información

El análisis de la información se basó en una revisión crítica y comparativa de los estudios seleccionados, organizada según criterios temáticos y metodológicos para facilitar su interpretación, se muestra a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Método de análisis de la información

Aspecto	Descripción
Tipo de análisis	Lectura crítica, comparativa e interpretativa de los estudios
Organización de la información	Clasificación por país, servicio ecosistémico, metodología y resultados
Enfoque comparativo	Comparación entre sistemas agroforestales con café y sistemas a pleno sol
Criterio temporal	Evaluación de los servicios ecosistémicos en escalas de largo plazo

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión de literatura científica sobre valoración de servicios ecosistémicos en cafetales agroforestales

Resultados y discusión

Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con café

Los resultados reportados por Vallejos-Torres *et al.* (2024), Delgado-Vargas y Franco (2024) y Zaro *et al.* (2020) coinciden con que en los sistemas agroforestales con café se presenta más almacenamiento de carbono que en los monocultivos a plena luz solar. A pesar de que los trabajos fueron realizados en Perú, Colombia y Brasil, respectivamente, todos concluyeron que la incorporación de árboles de sombra favorece la acumulación de carbono en biomasa y suelo sin afectar el rendimiento del cultivo. Esto corrobora el concepto de relación positiva entre agroforestería y sostenibilidad ambiental dentro de los sistemas cafetaleros latinoamericanos.

La Figura 1 resumió comparativamente las diferencias entre los sistemas de café a pleno sol y los sistemas agroforestales bajo sombra según el efecto de la cobertura arbórea sobre el secuestro de carbono, la conservación del suelo y la biodiversidad. La Figura 2 se interpretó como un resumen de los resultados obtenidos en trabajos realizados en países latinoamericanos donde los sistemas agroforestales obtienen mejores beneficios ecosistémicos y ambientales que el monocultivo intensivo.

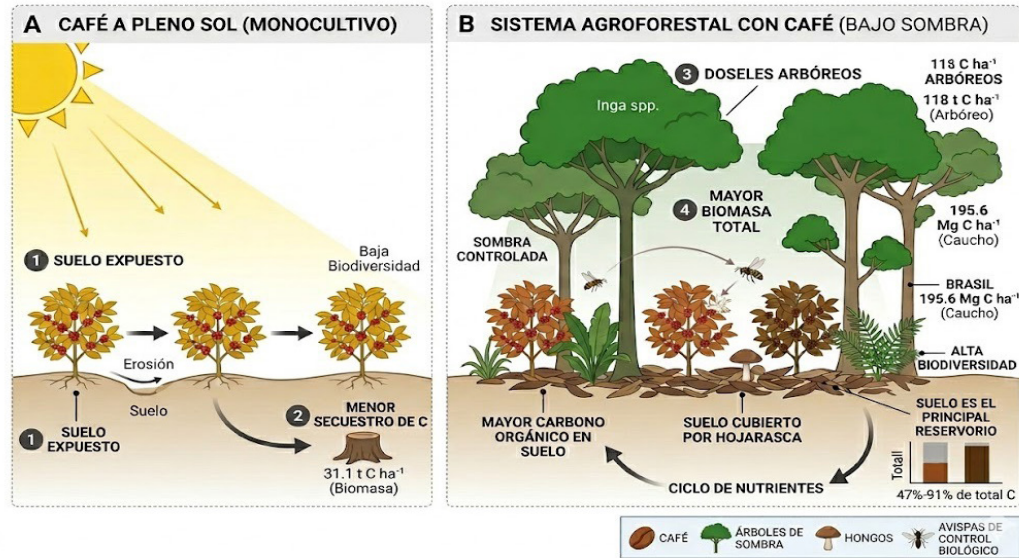


Figura 2. Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con café

Nota. Elaboración propia a partir de Vallejos-Torres *et al.* (2024), Zaro *et al.* (2020), Delgado-Vargas y Franco (2024) y Salgado *et al.* (2025).

En la Amazonía peruana, los estudios analizados evidenciaron una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales con café bajo sombra respecto a los sistemas sin sombra (Vallejos-Torres *et al.*, 2024). Estos resultados respaldan la importancia del componente arbóreo en la provisión de servicios ecosistémicos asociados a la mitigación del cambio climático, tal como se resume en la Tabla 2.

De manera similar, las investigaciones desarrolladas en Colombia reportan una respuesta favorable de los sistemas agroforestales en términos de almacenamiento de carbono en el suelo, asociada a una mayor diversidad florística y estructural, según se presenta en la Tabla 2.

En Brasil, la comparación entre sistemas agroforestales y monocultivos confirmó la misma tendencia. Plantaciones de café asociadas con árboles de caucho (*Hevea brasiliensis*) registraron valores de hasta 195,6 t C ha⁻¹, frente a 148,34 t C ha⁻¹ en sistemas a pleno sol, sin diferencias significativas en la productividad del cultivo (Zaro *et al.*, 2020). Estos resultados son particularmente relevantes para la discusión, ya que demuestran que la mejora en la provisión de servicios ecosistémicos no implica una penalización productiva, sino que puede coexistir con niveles de rendimiento similares, reforzando la viabilidad económica de los sistemas agroforestales.

Aunque los tres estudios coincidieron en reportar mayores niveles de carbono en sistemas agroforestales, se observaron diferencias en la magnitud de los resultados. En Perú, Vallejos-Torres *et al.* (2024) atribuyeron el incremento principalmente a la presencia de especies de sombra como *Inga spp.*, mientras que en Colombia Delgado-Vargas y Franco (2024) relacionaron los mayores valores con la diversidad florística

y el carbono orgánico del suelo. En Brasil, Zaro *et al.* (2020) destacaron la incorporación de árboles de caucho como un componente productivo adicional, aspecto que no fue evaluado en los estudios de Perú y Colombia.

Asimismo, estudios modernos destacaron que el suelo representa el principal compartimento de almacenamiento de carbono en cafetales agroforestales, pudiendo concentrar entre el 47 % y el 91 % del total del sistema, mientras que la biomasa del café contribuye solo entre un 2 % y un 7 % (Salgado *et al.*, 2025). Estos resultados refuerzan la discusión en torno al papel estratégico del manejo agroforestal como mecanismo de mitigación del cambio climático, al favorecer la acumulación de carbono en fracciones más estables del agroecosistema.

Con los resultados obtenidos por Vallejos-Torres *et al.* (2024), Salgado *et al.* (2025) y Zaro *et al.* (2020) se puede considerar que los sistemas agroforestales con café son una alternativa sostenible a los sistemas intensivos a pleno sol. Los hallazgos de los trabajos revisados mostraron que la sombra aumentó la captura y almacenamiento de carbono, especialmente en el suelo y en la biomasa aérea, lo que contribuyó a la mitigación del cambio climático. La similitud entre los resultados obtenidos en distintas latitudes en América Latina refuerza la consistencia de la evidencia científica revisada.

Estos hallazgos fortalecieron el argumento de que la agroforestería cafetalera constituye una alternativa sostenible frente a los sistemas intensivos a pleno sol, con implicaciones directas para la valoración económica de los servicios ecosistémicos y su potencial incorporación en políticas públicas y estrategias de desarrollo rural sostenible.

Secuestro y almacenamiento de carbono

Los hallazgos de la revisión mostraron que el secuestro y almacenamiento de carbono es uno de los servicios ecosistémicos más robustos y cuantificables en los agroforestales con café en Latinoamérica. En la Amazonía peruana, los cafetales bajo sombra tienen reservas totales de carbono de $118,2 \text{ t C ha}^{-1}$ cuando se asocian con *Inga spp.*, mientras que los cafetales sin sombra solo llegan a $31,1 \text{ t C ha}^{-1}$, una diferencia enorme que se debe al componente arbóreo (Vallejos-Torres *et al.*, 2024). Estos datos confirmaron que la presencia de árboles de sombra aumenta considerablemente el potencial de almacenamiento de carbono del sistema productivo.

Desde el punto de vista edáfico, la evidencia muestra que el suelo es un importante reservorio de carbono en los sistemas agroforestales. En Colombia, por ejemplo, se informa que los agroforestales con café aumentan el carbono orgánico del suelo en un 45 % más que en monocultivos, lo que se atribuye a la mayor diversidad florística y estructural del dosel (Delgado-Vargas y Franco, 2024).

Similares resultados se encuentran en Brasil, donde los sistemas agroforestales de café con árboles de caucho alcanzaron $195,6 \text{ t C ha}^{-1}$, mientras que en pleno sol se registraron $148,34 \text{ t C ha}^{-1}$, sin reducir la producción (Zaro *et al.*, 2020). Desde una perspectiva comparativa, estos hallazgos confirman que los sistemas agroforestales pueden conciliar productividad y mitigación del cambio climático, atenuando los conflictos entre metas económicas y ambientales.

El comportamiento del secuestro y almacenamiento

de carbono en sistemas agroforestales con café se resume en la Figura 3, donde se compararon cafetales a pleno sol y bajo sombra. También se observó el establecimiento de árboles asociados incrementó la biomasa y el carbono orgánico del suelo, garantizando sinergia entre producción agrícola y mitigación del cambio climático en los cafetales latinoamericanos.

Las tendencias halladas para Perú, Colombia y Brasil son similares en cuanto a la respuesta positiva de los sistemas agroforestales a la acumulación de carbono. Vallejos-Torres *et al.* (2024) y Zaro *et al.* (2020) indican que la presencia de árboles de sombra aumenta significativamente las reservas de carbono en biomasa y suelo en comparación con sistemas a pleno sol. Del mismo modo, Delgado-Vargas y Franco (2024) reportan incrementos significativos de carbono orgánico del suelo relacionados con mayor riqueza florística. La similitud entre estos estudios lleva a inferir que la agroforestería cafetalera representa una alternativa ambientalmente sostenible y funcional para la mitigación del cambio climático en diferentes contextos latinoamericanos.

Sin embargo, los enfoques metodológicos no fueron idénticos. Mientras Vallejos-Torres *et al.* (2024) cuantificaron reservas totales de carbono en diferentes arreglos productivos, Delgado-Vargas y Franco (2024) concentraron su análisis en el carbono orgánico del suelo. Por su parte, Zaro *et al.* (2020) compararon sistemas agroforestales con caucho y café frente a monocultivos, incorporando además variables relacionadas con la productividad del cultivo.

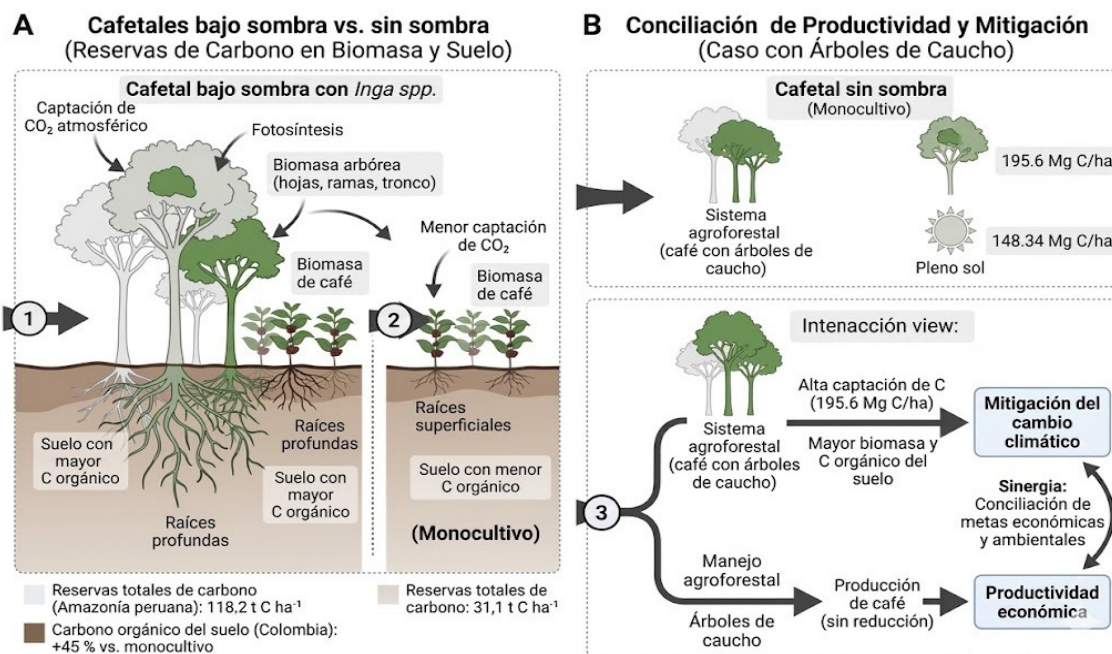


Figura 3. Secuestro y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café

Nota. Elaboración propia a partir de Vallejos-Torres *et al.* (2024), Delgado-Vargas y Franco (2024), Zaro *et al.* (2020) y Salgado *et al.* (2025).

Conservación de la biodiversidad y provisión de hábitat

La conservación de las plantaciones de café a la sombra es de suma importancia para la preservación de la biodiversidad y los hábitats en los paisajes agrícolas, debido a la alta complejidad estructural que proporcionan los árboles asociados. Harvey *et al.* (2021) y Manson *et al.* (2024) postulan que los sistemas agroforestales con café contribuyen a la conservación de biodiversidad por la cobertura arbórea y la complejidad estructural que otorgan los árboles acompañantes. Coinciden en que los cafetales bajo sombra actúan como refugios y corredores biológicos en paisajes cultivados fragmentados. Se deduce que la agroforestería cafetalera contribuye a la producción agrícola y a la conservación ecológica del paisaje recreando sinergias entre ambos factores.

Sin embargo, Centeno-Alvarado *et al.* (2024) mencionan que los beneficios no se presentan de manera uniforme entre los diferentes sistemas de café agroforestales; en el caso de la fauna, los cafetales con un porcentaje de sombra intermedia o alta (superior al 30–35 %) presentan mayor riqueza y abundancia; es especialmente notorio el efecto observado en insectos y aves; sin embargo, hay que señalar que la influencia del sistema agroforestal y la especie de sombra que lo caracteriza presentan resultados que dependen de las condiciones específicas del paisaje y de la región estudiada. En el mismo sentido, Harvey *et al.* (2021) explican que la conectividad de los fragmentos boscosos circundantes, así como la composición de la matriz productiva circundante, son factores que influyen directamente sobre el valor del hábitat para los cafetales. Por lo que se puede inferir que la conservación de biodiversidad es el resultado de factores tales como la presencia o no de árboles acompañantes, pero también depende del manejo que mantengan desde un enfoque ecológico y por las características propias de la matriz productiva.

El tiempo es otro eje. Evidencia de largo plazo en Colombia muestra que la provisión de hábitat y los servicios ecosistémicos asociados a biodiversidad aumentan a medida que envejecen los sistemas agroforestales. A partir de una cronosecuencia de hasta 40 años, se ha demostrado que la cobertura de dosel es el predictor más robusto de servicios relacionados con refugio de fauna y estructura del hábitat, lo que sugiere que la biodiversidad depende no solo de la presencia de árboles, sino de procesos de maduración ecológica y manejo sostenido (De Leijster *et al.*, 2021). Este resultado coincide con lo reportado en estudios multiservicio que destacan trayectorias positivas de biodiversidad en sistemas agroforestales consolidados frente a sistemas recientemente establecidos (Cerdeira *et al.*, 2020).

Desde la perspectiva del manejo, los estudios comparativos en Costa Rica aportan un matiz relevante al debate. Investigaciones en fincas cafetaleras certificadas y no certificadas muestran que los sistemas con certificación tienden a proveer mayores niveles de servicios de hábitat; sin embargo, estos beneficios no se explican exclusivamente

por el esquema de certificación, sino por la adopción efectiva de prácticas de conservación en finca (Pico-Mendoza *et al.*, 2020). La presencia de sombra heterogénea, la conservación del suelo y la disminución de insumos externos son elementos cruciales, en línea con estudios que cuestionan la certificación como garantía automática de desempeño ambiental (Haggard *et al.*, 2021).

En México se abre la discusión para ligar biodiversidad con caminos de intensificación y planificación territorial. Estudios en Veracruz priorizan especies arbóreas nativas con criterios ecológicos y locales, demostrando que es posible diseñar arreglos de sombra que benefician la provisión de hábitat sin sacrificar la productividad (Flores-Ortiz *et al.*, 2025). Además, estudios espaciales de intensificación cafetalera muestran que los cambios en la cobertura vegetal alteran los indicadores de biodiversidad, por lo cual es necesario enfocar la conservación a escala de paisaje y no solo a nivel de parcela (Manson *et al.*, 2024).

En términos comparativos, los estudios incluidos concuerdan en que la biodiversidad de los sistemas de producción de café agroforestales dependerá principalmente de la cobertura arbórea y la conectividad ecológica del paisaje. Harvey *et al.* (2021), Centeno-Alvarado *et al.* (2024), Manson *et al.* (2024) reportan que los sistemas con sombra intermedia o alta presentan mejores condiciones para almacenar y conservar fauna y provisión de hábitat. Si bien existen variaciones regionales entre los resultados reportados, los autores concuerdan en que los sistemas agroforestales son más funcionales a nivel ecológico que los monocultivos intensivos a pleno sol.

Polinización y control biológico

Los Cafetales de sombra promueven servicios de polinización y control biológico: “representan un incremento espacio-temporal de hábitats y recursos florales para los insectos benéficos” (Jezeer *et al.*, 2019; Centeno-Alvarado, 2024). Se reportó mayor abundancia de abejas nativas y otros polinizadores en sistemas agroforestales comparados con cafetales a sol pleno (Jezeer *et al.*, 2019; Centeno-Alvarado *et al.*, 2024). Pereira Machado *et al.* (2024) indicaron que la proximidad a la vegetación nativa incrementa las tasas de visita floral y la calidad del grano, reforzando la relación biodiversidad-productividad.

Desde un punto de vista cuantitativo, estudios demuestran que coberturas de sombra superiores al 35 % se relacionan con incrementos constantes en la diversidad de abejas y otros polinizadores importantes. Un metaanálisis de cafetales agroforestales muestra que la cobertura arbórea y la cercanía a vegetación natural (<500 m) son los principales factores que explican la variación en los servicios de polinización (Centeno-Alvarado *et al.*, 2024). Además, estudios experimentales en Brasil han demostrado que las áreas de borde de cafetales próximas a vegetación nativa tienen mayores tasas de visita floral y mejor calidad de grano, demostrando una relación

funcional entre biodiversidad y rendimiento (Pereira Machado *et al.*, 2024)

Esta información descrita indica que los servicios de polinización y control biológico en cafetales no están determinados por el sistema productivo en sí, sino por su contexto en el paisaje y prácticas de manejo que promuevan la heterogeneidad estructural. Si bien la literatura evidencia sinergias entre biodiversidad y producción bajo ciertos niveles de sombra, también es cierto que estos beneficios se pierden en sistemas altamente intensificados o aislados de remanentes naturales. Por lo cual, la agroforestería cafetalera puede ser una manera de mantener estos servicios, siempre y cuando haya un balance entre cobertura arbórea, manejo agronómico y conectividad ecológica.

Los resultados obtenidos por Jezeer *et al.* (2019), Centeno-Alvarado *et al.* (2024) y Pereira Machado *et al.* (2024) se asemejan. Los tres estudios indican que existe una relación positiva entre la cobertura arbórea y la cantidad de polinizadores. Se menciona que la riqueza de insectos benéficos es mayor en los sistemas de sombra y en las proximidades de la vegetación nativa, así como en los sistemas agroforestales con sombras multipropósitos, sugiriendo que las prácticas de manejo propuestas favorecen los beneficios ecosistémicos de polinización, lo cual está relacionado con una mayor riqueza y abundancia de estos organismos, fortaleciendo la biodiversidad del sistema y favoreciendo su productividad, lo que demuestra que los servicios ecosistémicos de polinización dependen parcialmente de las prácticas de manejo compatibles con el manejo ecológico.

Regulación hídrica y conservación de suelos

Uno de los servicios ecosistémicos asociados a cafetales con sombra es la conservación de suelos y la regulación hídrica, debido a los efectos que el dosel y la cobertura del suelo

tienen sobre los procesos hidrológicos. En Centroamérica y Brasil, se ha demostrado que los agroecosistemas reducen la escorrentía y la pérdida de suelo más que los cafetales a pleno sol. En Nicaragua, mediciones de erosión hídrica en parcelas de cafetales bajo sistemas agroforestales, se reportaron reducciones significativas, lo que se atribuyó a la cobertura protectora del suelo de arbóreo y hojarasca (Blanco-Sepúlveda *et al.*, 2024).

La comparación de cafetales a pleno sol y bajo sombra muestra que los sistemas bajo sombra presentan un microclima más estable, con menor erosión y pérdida de agua. En Brasil, los sistemas de sombra, en comparación con los sistemas de pleno sol, reducen la escorrentía y la pérdida de sedimentos y, además, mantienen mejores condiciones de humedad del suelo y temperatura (De Carvalho *et al.*, 2021). También, en Costa Rica, el café con especies arbóreas como Inga, mejora la captación de agua y disminuye la percolación profunda, lo que contribuye a la regulación del ciclo hídrico a nivel de parcela (Haggar *et al.*, 2021).

Evidencia cuantitativa y valoración económica de los servicios ecosistémicos

La Tabla 2 sintetiza la evidencia cuantitativa y la valoración económica reportada en estudios realizados en sistemas agroforestales con café en distintos países de Latinoamérica, destacando los principales servicios ecosistémicos evaluados, los valores biofísicos estimados y, cuando existe, su traducción en términos monetarios. Esta síntesis permite comparar enfoques metodológicos, magnitudes de los servicios y el grado de avance en la internalización económica de los beneficios ambientales asociados a la agroforestería cafetalera.

Tabla 2 Evidencia cuantitativa y valoración económica de los servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con café en Latinoamérica

País	Estudio (autor, año)	Servicio(s)	Evidencia cuantitativa (reportada)	Valoración económica (reportada)
Perú	(Vallejos-Torres <i>et al.</i> , 2024)	Carbono (reservas totales y suelo)	Bosque secundario: 132,2 t C ha ⁻¹ ; café con sombra (*Inga*): 118,2 t C ha ⁻¹ ; policultivo: 76,5 t C ha ⁻¹ ; café sin sombra: 31,1 t C ha ⁻¹ ; carbono orgánico del suelo (SOC): 29,05–45,7 t C ha ⁻¹ .	No reporta valoración monetaria
Perú	(Jezeer <i>et al.</i> 2019)	Múltiples servicios ecosistémicos	Mayor almacenamiento de carbono y provisión de servicios bajo sistemas con sombra, sin reducción del rendimiento del café	No reporta valoración monetaria
Colombia	(Delgado-Vargas y Franco, 2024)	Carbono orgánico del suelo (COS)	Sistemas agroforestales incrementan el COS en 45 % frente a monocultivo; relación positiva con diversidad florística y estructural	No reporta valoración monetaria

País	Estudio (autor, año)	Servicio(s)	Evidencia cuantitativa (reportada)	Valoración económica (reportada)
Brasil	(Zaro et al., 2020)	Secuestro y almacenamiento de carbono	SAF (café + caucho): 195,6 t C ha ⁻¹ ; café a pleno sol: 148,34 t C ha ⁻¹ .	Reporta ingreso adicional por extracción de látex, sin cuantificación monetaria específica
Brasil	(Pereira Machado et al., 2024)	Polinización (impacto productivo y económico)	Mayor visita floral en bordes de plantación; mejoras en cuajado de frutos, semillas y calidad del grano	Ganancia económica potencial estimada mediante extrapolación del efecto de borde (US\$1.736,37/ha /ha); escenario modelado
México	(Charoud et al. 2023)	PSA / Conservación de bosque (co-beneficios: carbono, biodiversidad, agua)	En Selva Lacandona (Chiapas), la cobertura forestal en sitios con 10 años en PES fue 16.5% mayor frente a no enrolados comparables; contratos típicos de 5 años renovables. (Nature)	Pagos del programa reportados como 550–1000 MXN/ha (≈ US\$ 31–57/ha) bajo contratos de 5 años renovables. (Nature)
Costa Rica	(Murguía et al., 2022)	PSA nacional (conservación forestal; servicios reconocidos por ley)	Evaluación con 3,495 solicitantes (2016–2019); el estudio reporta una disminución estadísticamente significativa de la deforestación el primer año tras ingresar al PSA; también contextualiza el aumento de cobertura forestal del país (1980→2021).	El programa acumuló pagos por US\$ 565 millones y protegió 1,158,512.60 ha (cifras acumuladas del programa).
Nicaragua	(Blanco-Sepúlveda et al., 2024)	Control de erosión (suelo y agua)	Reducción significativa de pérdida de suelo asociada a sombra y cobertura vegetal (17 parcelas en 8 fincas)	No reporta valoración monetaria
Ecuador	(Guerrero Villegas, 2017)	Servicio hídrico en sistemas cafetaleros agroforestales	Estimación de disponibilidad y regulación hídrica en cafetales orgánicos con sombra (zona de Íntag, Imbabura)	Valoración económica mediante disposición a pagar (DAP) por conservación del servicio hídrico
Ecuador	(Moreira Muñoz, 2025)	Captura y almacenamiento de carbono	Los sistemas agroforestales de café registraron reservas de 4,72 t C ha ⁻¹ y 17,33 t CO ₂ ha ⁻¹ , asociadas a una densidad promedio de 15,8 árboles ha ⁻¹ .	No reporta valoración monetaria directa; datos aptos para conversión económica vía precio social o mercado del carbono
Haití	(Millet et al., 2025)	Paquetes (“bundles”) de servicios ecosistémicos	Identificación de conjuntos de servicios ecosistémicos asociados a la agrobiodiversidad	No reporta valoración monetaria

Nota. Algunos estudios incluyen valores económicos de los servicios ecosistémicos, mientras que otros reportan únicamente información biofísica.

Los datos de América Latina documentan y respaldaron el caso de que los sistemas agroforestales de café a la sombra proporcionan mayores servicios ecosistémicos que los monocultivos a pleno sol. Estos servicios ecosistémicos incluyen la captura de carbono, la regulación del agua, la conservación del suelo y el apoyo a la biodiversidad.

Sin embargo, la valoración económica de los servicios

ecosistémicos sigue estando poco investigada y es muy inconsistente de país a país, lo que dificulta la valoración de los servicios ecosistémicos en las políticas públicas y en los marcos de decisión de producción.

En el caso de Perú, se han reportado diferencias significativas en la capacidad de captura de carbono entre los distintos sistemas productivos. Los sistemas agroforestales

con café bajo sombra presentan mayores reservas de carbono que los monocultivos a pleno sol, lo que evidencia su aporte a la mitigación del cambio climático (Vallejos-Torres *et al.*, 2024). No obstante, estos beneficios continúan expresándose principalmente en términos biofísicos, sin una valoración económica que permita compararlos con otras alternativas de uso del suelo.

Como se observa en la Tabla 2, los estudios desarrollados en Colombia evidencian una mayor acumulación de carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales respecto a los monocultivos. Estos resultados reafirman la contribución de la agroforestería a la mitigación del cambio climático; sin embargo, persiste la ausencia de valoraciones económicas que permitan incorporar estos beneficios en mecanismos de incentivos ambientales.

De manera similar, la evidencia reportada para Brasil muestra ventajas ambientales y productivas asociadas a los sistemas agroforestales con café. No obstante, aunque algunos estudios reconocen beneficios económicos complementarios derivados de actividades asociadas, aún son escasas las investigaciones que cuantifican de forma integral el valor económico de los servicios ecosistémicos generados por estos sistemas.

Los mayores avances en la valoración económica directa se dan en servicios relacionados con la polinización y las herramientas de política ambiental. En Brasil, por ejemplo, estudios calculan que la mayor visita floral de polinizadores en márgenes de cafetales adyacentes a vegetación nativa se refleja en un mejor cuajado de frutos, calidad del grano y rendimiento, lo que podría generar una ganancia económica potencial modelada de US\$ 1,736.37 por hectárea (Pereira Machado *et al.*, 2024).

Estas aproximaciones hacen visible la contribución económica indirecta de la biodiversidad, pero su extrapolación a otras formas productivas es delicada, ya que depende del paisaje y las prácticas locales. En México, la valoración económica se ha integrado sobre todo a través de programas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA). En la Selva Lacandona, los sitios inscritos 10 años en PSA tuvieron 16.5 % más cobertura forestal que áreas comparables no inscritas, con pagos de 550–1,000 MXN/ha (US\$ 31–57/ha) en contratos renovables (Charoud *et al.*, 2023). Si bien son pequeñas cantidades, demuestran un reconocimiento económico explícito por los servicios ecosistémicos.

Así también en centro América, en países como Costa Rica es el caso más consolidado de institucionalización de la valoración económica. Su programa nacional de PSA, que reconoce legalmente servicios como captura de carbono, regulación hídrica y conservación de biodiversidad, acumuló pagos cercanos a US\$ 565 millones y protegió más de 1.15 millones de hectáreas. Murguía *et al.* (2022), señalaron la disminución estadísticamente significativa de la deforestación dentro del primer año de participación en el programa.

En contraste con otros países de la región, Ecuador

presenta experiencias puntuales de valoración económica de servicios ecosistémicos vinculados a sistemas agroforestales con café. Como se muestra en la Tabla 2, las investigaciones disponibles han abordado principalmente la valoración del recurso hídrico y la estimación de la captura de carbono; sin embargo, todavía existe una limitada incorporación de estos resultados en instrumentos económicos o mecanismos de mercado ambiental (Moreira Muñoz, 2025).

Conclusiones

La literatura muestra que los sistemas agroforestales con café varían en los servicios ecosistémicos que ofrecen entre países, en función del tipo de manejo, composición arbórea y entorno. En Perú, los cafetales bajo sombra alcanzan reservas de carbono cercanas a 118,2 t C ha⁻¹, mientras que los sistemas a pleno sol apenas registran 31,1 t C ha⁻¹, lo que demuestra una brecha sustancial atribuida a la estructura agroforestal. En Brasil, los sistemas agroforestales combinados con café y caucho alcanzan valores aún mayores, hasta 195,6 t C ha⁻¹, muy superiores a los monocultivos, sin reducir los rendimientos productivos.

El suelo tiene la mayor cantidad de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros, aunque la magnitud varía en el espacio. En Colombia, estudios reportan incrementos de aproximadamente el 45% en carbono orgánico del suelo en agroforestería en comparación con monocultivos, relacionado con una mayor diversidad florística. En contraste, estudios en la Amazonía peruana indicaron que el suelo puede representar entre el 47% y el 91% del carbono total almacenado, reflejando una mayor estabilidad de carbonatos en regiones con un manejo agroforestal más consolidado.

En términos de biodiversidad y servicios ecosistémicos, los sistemas agroforestales de café tienen los mejores resultados en países con más cobertura arbórea y conectividad del paisaje. En México y Colombia, los sistemas con más del 30-35% de cobertura arbórea son más ricos en polinizadores y fauna asociada, mientras que en sistemas más intensificados se pierden estos beneficios. Estas diferencias muestran que la provisión de servicios ecosistémicos no depende únicamente del cultivo de café, sino del contexto territorial y el manejo a largo plazo del sistema.

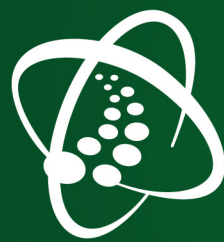
La estimación de la economía de servicios ecosistémicos en Latinoamérica es todavía una actividad en desarrollo. En cuanto a la polinización, en Brasil se ha calculado un ingreso potencial cercano a US\$ 1.736 por hectárea, por mejoras en la calidad y en la cantidad del grano. En México y Costa Rica se han pagado en aparente relación a la conservación de los bosques entre US\$ 31 y 57 por hectárea. En contraposición, en la mayor parte de Perú, Colombia y Ecuador predominan las estimaciones biofísicas sin monetización, lo que limita su incorporación en instrumentos de políticas públicas y sistemas de incentivos.

Referencias

- Blanco-Sepúlveda, R., Lima, F., y Aguilar-Carrillo, A. (2024). An assessment of the shade and ground cover influence on the mitigation of water-driven soil erosion in a coffee agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 98(6), 1771-1782. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00989-6>
- Briceño Salas, J. P., y Torres, V. (2024). Estrategias en sistemas agroforestales aplicadas al café. *Bosques Latitud Cero*, 14(2), 40-50. <https://doi.org/10.54753/blc.v14i2.2219>
- Centeno-Alvarado, D., Lopes, A. V., y Arnan, X. (2024). Shaping pollinator diversity through coffee agroforestry management: A meta-analytical approach. *Insect Conservation and Diversity*, 17(5), 729-742. <https://doi.org/10.1111/icad.12755>
- Cerda, R., Avelino, J., Harvey, C. A., Gary, C., Tixier, P., y Allinne, C. (2020). Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149>
- Charoud, H., Costedoat, S., Izquierdo-Tort, S., Moros, L., Villamayor-Tomás, S., Castillo-Santiago, M. Á., Wunder, S., y Corbera, E. (2023). Sustained participation in a Payments for Ecosystem Services program reduces deforestation in a Mexican agricultural frontier. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49725-7>
- De Carvalho, A. F., Fernandes-Filho, E. I., Daher, M., Gomes, L. de C., Cardoso, I. M., Fernandes, R. B. A., y Schaefer, C. E. G. R. (2021). Microclimate and soil and water loss in shaded and unshaded agroforestry coffee systems. *Agroforestry Systems*, 95(1), 119-134. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00567-6>
- De Leijster, V., Santos, M. J., Wassen, M. W., Camargo García, J. C., Llorca Fernandez, I., Verkuil, L., Scheper, A., Steenhuis, M., y Verweij, P. A. (2021). Ecosystem services trajectories in coffee agroforestry in Colombia over 40 years. *Ecosystem Services*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101246>
- Delgado-Vargas, I. A., & Franco, N. B. (2024). Soil organic carbon storage in different agroforestry systems associated with coffee in Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 36, 59765. <https://doi.org/10.15517/am.2024.59765>
- Flores-Ortiz, C. M., Davila, P., Rodríguez-Arevalo, I., Manson, R. H., Toledo-Garibaldi, M., Cabrera-Santos, D., Salguero, M. A., Vázquez, F. G., Cobos-Silva, J., Gianella, M., Bell, E., Way, M., Mattana, E., y Ulian, T. (2025). Prioritisation of native trees for enhancing carbon sequestration in shade-grown coffee plantations in the State of Veracruz (México): linking conservation and ecological traits to community needs. *Agroforestry Systems*, 99(3). <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01155-2>
- Galeana-Pizaña, J. M., & Manson, R. H. (2025). Mapping coffee intensification in Mexico: a multivariate spatial analysis approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1649756>
- Guerrero Villegas, W. M. (2017). *Valoración de los servicios ecosistémicos hídricos en la cadena de valor del café orgánico de la zona de intag* [Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6724>
- Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A. E., y Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Recimundo*, 4(3), 163-173. <https://www.recimundo.com/index.php/es/article/view/860>
- Haggar, J., Casanoves, F., Cerda, R., Cerretelli, S., Gonzalez-Mollinedo, S., Lanza, G., Lopez, E., Leiva, B., y Ospina, A. (2021). Shade and Agronomic Intensification in Coffee Agroforestry Systems: Trade-Off or Synergy?. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.645958>
- Harvey, C., Prittss, A., Zwetsloot, M., Jansen, K., Pulleman, M., Armbrrecht, I., Avelino, J., Barrera, J., Bunn C., García, J. H., Isaza, C., Munoz-Ucros, J., Pérez-Alemán, C. J., Rahn, E., Robiglio, V., Somarriba, E., y Valencia, V. (2021). Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review. Una revisión. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(62), 1-19. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-021-00712-0>
- Jezeer, R. E., Santos, M. J., Verweij, P. A., Boot, R. G. A., y Clough, Y. (2019). Benefits for multiple ecosystem services in Peruvian coffee agroforestry systems without reducing yield. *Ecosystem Services*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101033>
- Manson, S., Nekaris, K. A. I., Nijman, V., & Campera, M. (2024). Effect of shade on biodiversity within coffee farms: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 914, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169882>
- Millet, C. P., Jeune, W., Guervil, J. S., St Armand, L. A., Amazan, J. F., Duval, G., Jean Louis, R. B., Robert, B., Poncet, V., y Allinne, C. (2025). Ecosystem service bundles associated with agrobiodiversity in agroforestry systems: A case study of two coffee-growing regions of Haiti. *Ecosystem Services*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101782>
- Moreira Muñoz, H. G. (2025). *Potencial de captura de carbono y resiliencia climática para café agroforestal en Palanda, Zamora Chinchipe* [Tesis de maestría, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/items/164fe466-f1a7-43ee-9043-b4317ebfdeb4>

- Murguía, J., Ordoñez, P., Corral, L., y Navarrete-Chacon, G. (2022). Payment for Ecosystem Services in Costa Rica: Evaluation of a Country-Wide Program. *Inter-American Development Bank Environment, Rural Development and Disaster Risk Management Division*, (pp. 1–10). <https://publications.iadb.org/en/payment-ecosystem-services-costa-rica-evaluation-country-wide-program>
- Pereira Machado, A. C., Baronio, G. J., Soares Novaes, C., Ollerton, J., Wolowski Torres, M., Silva Lopes, D. N., y Rech, A. R. (2024). Optimizing coffee production: Increased floral visitation and bean quality at plantation edges with wild pollinators and natural vegetation. *Journal of Applied Ecology*, 61(3), 465–475. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14591>
- Pico-Mendoza, J., Pinoargote, M., Carrasco, B., y Limongi Andrade, R. (2020). Ecosystem services in certified and non-certified coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(7), 902–918. <https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1713962>
- Ruiz García, P., Gómez Díaz, J. D., Valdes Velarde, E., y Monterroso Rivas, A. I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*, 16(4), 137-158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>
- Salgado Veramendi, N., Romero-Chavez, L. E., Huerto Pajuelo, E. S., Ibarra Porras, C. del C., Cunyas-Camayo, J. M., Aldava Pardave, U., Vallejos-Torres, G., y Solórzano Acosta, R. (2025). Carbon storage in coffee agroforestry systems: role of native and introduced shade trees in the central peruvian amazon. *Agriculture (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/agriculture15131415>
- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jimenez, N., Pichis-García, R., Ordoñez, L., García-Gonzales, P., Quinteros, A., Lozano, A., Saavedra-Ramírez, J., Tuesta-Hidalgo, J. C., Reategui, K., Macedo-Córdova, W., Baselly-Villanueva, J. R., y Marín, C. (2024). Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1410418>
- Zaro, G. C., Caramori, P. H., Yada Junior, G. M., Sanquetta, C. R., Filho, A. A., Nunes, A. L. P., Prete, C. E. C., y Voroney, P. (2020). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. *Agroforestry Systems*, 94(3), 799-809. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>





CIENCIA Y TECNOLOGÍA

revistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt



cienciaytecnologia@uteq.edu.ec



+593 997507331

