

Evaluación del impacto ambiental y uso de fertilizantes nitrogenados en la producción de banano (*Musa spp.*)

Environmental impact assessment and use of nitrogen fertilizers in banana (*Musa spp.*) production

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18945006>

AUTORES:

Hevert Daniel Alvia-Parraga^{1*}

Evelyn Dayana Yanez-Bajaña²

Cintia Brigitte Solorzano-Calderón³

Jackson Andres Alcazar-Garcia⁴

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: hevert_danny@yahoo.es

Fecha de recepción: 10 / 11 / 2025

Fecha de aceptación: 14 / 01 / 2026

RESUMEN

El banano (*Musa spp.*) constituye uno de los cultivos frutícolas de mayor importancia económica a nivel mundial, con especial relevancia en Ecuador, principal exportador desde mediados del siglo XX. El modelo productivo intensivo adoptado en sistemas tropicales ha dependido de la aplicación sostenida de fertilizantes nitrogenados para mantener altos rendimientos; sin embargo, su uso excesivo ha generado impactos ambientales

¹Facultad de Agraria, Carrera de Ingeniería Agropecuaria, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo – Ecuador; hevert_danny@yahoo.es; <https://orcid.org/0009-0004-8993-7517>

²Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas, Carrera de Ingeniería Agropecuaria, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo – Ecuador; evelyn.yanez2018@uteq.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0000-8686-9337>

³Facultad de Posgrado, Carrera de Agroecología y Desarrollo Sostenible, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo-Ecuador; cintiasolorzanocalderon@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-1063-3373>

⁴Facultad de Posgrado, Magíster en Gestión Ambiental, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo – Ecuador; jalcarg@uteq.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0009-2344-4847>

significativos. Entre los principales efectos se encuentran la lixiviación de nitratos hacia aguas superficiales y subterráneas, la emisión de óxido nitroso (N_2O) gas con elevado potencial de calentamiento global y procesos de acidificación y alteración de la dinámica microbológica del suelo. El presente estudio desarrolló una revisión bibliográfica sistemática con síntesis estadística comparativa de investigaciones publicadas entre 2020 y 2026, con el propósito de evaluar la relación entre dosis de nitrógeno e indicadores agroambientales en sistemas bananeros tropicales. Se analizaron variables como dosis anual aplicada ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), rendimiento, eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), concentraciones de nitratos en agua y emisiones de N_2O . Los resultados evidencian que aplicaciones superiores a $300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se asocian con disminución de la EUN (inferior al 55 %) y mayor riesgo de pérdidas ambientales. Se concluye que la optimización de la fertilización nitrogenada es determinante para mejorar la sostenibilidad productiva, reducir externalidades ambientales y fortalecer la competitividad del sistema bananero.

Palabras clave: Fertilización nitrogenada, impacto ambiental, lixiviación, N_2O , sostenibilidad.

ABSTRACT

Bananas (*Musa spp.*) are one of the most economically important fruit crops in the world, with special relevance in Ecuador, the main exporter since the mid-twentieth century. The intensive production model adopted in tropical systems has depended on the sustained application of nitrogen fertilizers to maintain high yields; however, its excessive use has generated significant environmental impacts. Among the main effects are the leaching of nitrates into surface and groundwater, the emission of nitrous oxide (N_2O) a gas with a high global warming potential and acidification processes and alteration of the microbiological dynamics of the soil. The present study developed a systematic literature review with comparative statistical synthesis of research published between 2020 and 2026, with the purpose of evaluating the relationship between nitrogen doses and agri-environmental indicators in tropical banana systems. Variables such as annual dose applied ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), yield, nitrogen use efficiency (EUN), nitrate concentrations in water and N_2O emissions were analyzed. The results show that applications greater than 300 kg N ha^{-1}

year⁻¹ are associated with a decrease in EUN (less than 55%) and a greater risk of environmental losses. It is concluded that the optimization of nitrogen fertilization is decisive to improve productive sustainability, reduce environmental externalities and strengthen the competitiveness of the banana system.

Keywords: Nitrogen fertilization, environmental impact, leaching, N₂O, sustainability.

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, el cultivo de banano representa una de las actividades agrícolas más dinámicas del comercio mundial de frutas frescas. Más de 130 países producen *Musa spp.*, siendo América Latina responsable de una proporción significativa de las exportaciones globales (Vargas-Sarmiento *et al.*, 2025). La intensificación productiva en regiones tropicales ha incrementado el uso de insumos químicos, particularmente fertilizantes nitrogenados, debido a la alta demanda nutricional del cultivo y a la necesidad de mantener productividad constante durante todo el año. Este modelo de producción ha generado cuestionamientos ambientales relacionados con la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tropicales (Quiala & Vera, 2025).

En el contexto nacional, Ecuador consolidó su industria bananera a partir de la década de 1950, convirtiéndose en el principal exportador mundial. La expansión de la frontera agrícola y la tecnificación del manejo agronómico han estado acompañadas por una fertilización intensiva, especialmente con fuentes nitrogenadas de rápida disponibilidad. Provincias como Los Ríos, Guayas y El Oro concentran la mayor superficie cultivada, en zonas caracterizadas por alta pluviosidad y suelos de textura variable, condiciones que influyen en la dinámica del nitrógeno en el sistema suelo planta atmósfera (Carbajal *et al.*, 2025).

A nivel local, diversas iniciativas han sido implementadas para reducir el impacto ambiental del sector bananero, incluyendo programas de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), certificaciones ambientales y monitoreo de calidad de agua (Velasco *et al.*, 2026). No obstante, aún persisten desafíos relacionados con la eficiencia del uso del nitrógeno y la mitigación de pérdidas hacia el ambiente (González *et al.*, 2025).

El impacto ambiental derivado del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados se manifiesta principalmente a través de la lixiviación de nitratos, la emisión de gases de efecto invernadero y la degradación progresiva del suelo. En regiones tropicales húmedas, los nitratos pueden movilizarse fácilmente hacia aguas subterráneas, mientras que los procesos de nitrificación y desnitrificación favorecen la liberación de N_2O a la atmósfera (Ortega-Bonilla *et al.*, 2022).

El uso continuo de fertilizantes químicos nitrogenados, aunque efectivo para estimular el crecimiento vegetativo y aumentar el rendimiento, puede reducir la eficiencia del sistema productivo cuando no se ajusta a las necesidades reales del cultivo (Lizcano *et al.*, 2025). La baja eficiencia de uso del nitrógeno no solo incrementa costos, sino que también amplifica las pérdidas ambientales y los riesgos sanitarios asociados a la contaminación del agua y la exposición ocupacional.

En este contexto, el objetivo general del presente estudio fue evaluar de manera integral el impacto ambiental del uso de fertilizantes nitrogenados en la producción de banano (*Musa spp.*), mediante una revisión sistemática de literatura científica y un análisis comparativo de variables agroambientales, con el fin de proponer lineamientos orientados a mejorar la sostenibilidad del sistema productivo.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un diseño de revisión sistemática con síntesis cuantitativa secundaria, orientada a evaluar el impacto ambiental del uso de fertilizantes nitrogenados en sistemas productivos de banano (*Musa spp.*) bajo condiciones tropicales. Se adoptó un enfoque comparativo, permitiendo integrar resultados provenientes de diferentes contextos geográficos mediante la estandarización de variables en unidades homogéneas. Con el fin de garantizar coherencia metodológica, todas las dosis de nitrógeno reportadas fueron expresadas en kilogramos de N por hectárea por año ($kg\ N\ ha^{-1}\ año^{-1}$), independientemente de si los estudios originales reportaban aplicaciones fraccionadas por ciclo productivo.

La recopilación de información se efectuó en bases de datos indexadas entre los años 2020 y 2026, priorizando artículos científicos revisados por pares, estudios experimentales de

campo y reportes técnicos con respaldo metodológico explícito. Se emplearon combinaciones de términos como “banana nitrogen fertilization”, “nitrogen use efficiency in *Musa spp.*”, “nitrate leaching tropical soils”, “N₂O emissions banana systems” y “environmental impact nitrogen”. La búsqueda se restringió a investigaciones realizadas en regiones con condiciones climáticas comparables a sistemas tropicales húmedos, especialmente aquellas con precipitaciones superiores a 1 500 mm anuales.

Se incluyeron estudios que reportaran explícitamente: (i) dosis de nitrógeno aplicadas en kg ha⁻¹ por ciclo o por año, (ii) rendimiento expresado en toneladas por hectárea (t ha⁻¹), (iii) eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) en porcentaje o datos que permitieran su cálculo, y (iv) indicadores ambientales cuantificables como concentración de nitratos en agua (mg L⁻¹) o emisiones de N₂O (kg ha⁻¹ año⁻¹). Cuando las emisiones de N₂O fueron reportadas en unidades distintas (por ejemplo, g m⁻² año⁻¹), se convirtieron a kg ha⁻¹ año⁻¹ para mantener uniformidad comparativa. Se excluyeron investigaciones que no especificaran claramente el período de evaluación, ya que la falta de delimitación temporal impide la comparación anualizada de impactos.

Las variables se organizaron en tres dimensiones estructuradas: En la dimensión agronómica se evaluó la dosis anual de nitrógeno (kg N ha⁻¹ año⁻¹), el rendimiento productivo (t ha⁻¹ año⁻¹) y la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), calculada cuando fue posible mediante la relación entre nitrógeno absorbido por el cultivo y nitrógeno aplicado, expresada en porcentaje.

En la dimensión ambiental se analizaron concentraciones promedio anuales de nitratos en agua superficial o subterránea (mg L⁻¹), emisiones anuales de óxido nitroso (kg N₂O ha⁻¹ año⁻¹) y variaciones en el pH del suelo como indicador de acidificación inducida por fertilización amoniacal.

En la dimensión de salud ocupacional se consideraron datos reportados sobre presencia de nitratos en agua potable en zonas agrícolas, así como registros epidemiológicos asociados a exposición crónica o aguda a fertilizantes nitrogenados.

Tratamiento estadístico y análisis comparativo: El análisis estadístico se basó en estadística descriptiva secundaria, incluyendo cálculo de medias ponderadas, rangos inter-estudio y

porcentajes de variación en función de la dosis aplicada. Se evaluaron tendencias no lineales entre dosis anual de nitrógeno y rendimiento, así como asociaciones reportadas entre dosis superior a 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹ y aumento en pérdidas ambientales.

Adicionalmente, se analizaron correlaciones reportadas en los estudios originales entre intensidad de fertilización y concentración de nitratos en agua, particularmente en suelos franco-arenosos bajo precipitaciones superiores a 2.000 mm anuales. Los resultados fueron sintetizados en tablas comparativas que permiten visualizar patrones consistentes.

RESULTADOS

Dosis de nitrógeno y eficiencia de uso del nitrógeno (EUN)

La síntesis comparativa de los estudios seleccionados evidenció que las dosis de nitrógeno aplicadas en sistemas bananeros tropicales oscilaron entre 200 y 450 kg N ha⁻¹ año⁻¹. En términos de eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), los valores reportados variaron entre 40 % y 60 %, dependiendo del manejo agronómico y las condiciones edafoclimáticas.

En general, se observó que cuando las dosis superaron los 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹, la EUN presentó una tendencia decreciente, sin incrementos proporcionales en el rendimiento productivo. Esta relación sugiere la existencia de un umbral técnico a partir del cual el nitrógeno adicional aplicado no es eficientemente asimilado por el cultivo.

Tabla 1. Comparación de dosis de nitrógeno y eficiencia reportada en sistemas bananeros tropicales

Condición agroecológica	Dosis N (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	EUN (%)	Principales hallazgos
Tropical húmedo	250	42–45	55	Balance adecuado entre absorción y aplicación
Alta precipitación (>2000 mm)	350	44–46	45	Incremento de pérdidas por lixiviación
Convencional intensivo	400	45–47	40	Meseta productiva sin aumento proporcional
Con cobertura vegetal	280	43–46	60	Mayor retención y reciclaje interno de N

Nota: Las dosis fueron estandarizadas en kg N ha⁻¹ año⁻¹. La EUN corresponde al porcentaje de nitrógeno absorbido por el cultivo respecto al aplicado. Los rangos de rendimiento reflejan variabilidad interanual reportada en cada estudio.

Los datos muestran que el rendimiento promedio se estabiliza en un rango de 44–47 t ha⁻¹ año⁻¹ cuando las dosis superan los 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹, lo que indica una respuesta no lineal del cultivo al incremento de fertilización. Sin embargo, la EUN disminuye aproximadamente entre 10 y 20 puntos porcentuales cuando se comparan dosis de 250–280 kg N ha⁻¹ año⁻¹ frente a aplicaciones de 350–400 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Esta reducción implica que entre 40 % y 60 % del nitrógeno aplicado puede no ser aprovechado eficientemente en sistemas intensivos.

Lixiviación de nitratos y contaminación hídrica

Los estudios evaluados en regiones con precipitaciones superiores a 1 800 mm anuales reportaron concentraciones variables de nitratos en aguas subterráneas asociadas a la fertilización nitrogenada en plantaciones bananeras. En sistemas con aplicaciones superiores a 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹ y suelos de textura franca-arenosa, las concentraciones registradas se aproximaron o superaron el límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud (50 mg L⁻¹).

Tabla 2. Concentraciones de nitratos reportadas en zonas bananeras

Precipitación (mm año⁻¹)	Dosis N (kg ha⁻¹ año⁻¹)	NO₃⁻ en agua (mg L⁻¹)	Clasificación de riesgo
2200	320	45–52	Riesgo moderado-alto
1800	280	30–38	Dentro del límite
2400	400	52–65	Supera límite OMS

Nota: Las concentraciones corresponden a mediciones en agua subterránea cercana a áreas productivas. El límite de referencia OMS para consumo humano es 50 mg L⁻¹ de nitratos.

Se evidencia una tendencia creciente en la concentración de nitratos conforme aumenta la dosis aplicada y el régimen de precipitación. Los sistemas con 400 kg N ha⁻¹ año⁻¹ bajo precipitaciones superiores a 2.400 mm mostraron concentraciones entre 52 y 65 mg L⁻¹, superando el umbral de seguridad sanitaria. En contraste, aplicaciones de 280 kg N ha⁻¹ año⁻¹ bajo menores precipitaciones mantuvieron niveles dentro del límite permitido. Estos resultados confirman la interacción dosis-clima-textura como determinante del riesgo de lixiviación.

Emisiones de gases de efecto invernadero

Los estudios analizados reportaron que las emisiones de óxido nitroso (N_2O) en sistemas bananeros tropicales variaron entre 2 y 8 $\text{kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, dependiendo de la dosis nitrogenada aplicada, la humedad del suelo y el sistema de manejo agronómico. Se observó que las mayores emisiones se registraron en sistemas convencionales intensivos con aplicaciones superiores a 350 $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, particularmente en condiciones de alta saturación hídrica que favorecen procesos de nitrificación y desnitrificación.

En contraste, sistemas con cobertura vegetal permanente o manejo parcialmente orgánico mostraron emisiones significativamente menores, lo que sugiere una mayor inmovilización biológica del nitrógeno y mejor regulación microbiana del suelo.

Tabla 3. Emisiones anuales de N_2O según sistema de manejo en plantaciones bananeras tropicales

Sistema productivo	Dosis N ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	Emisión N_2O ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	Condición edáfica predominante	Observación principal
Convencional intensivo	400	6–8	Alta humedad (>70 % CC)	Elevada desnitrificación
Convencional moderado	300	4–5	Humedad variable	Emisión dependiente del régimen de lluvias
Con cobertura vegetal	280	2–3	Mejor estructura del suelo	Mayor reciclaje interno de N
Manejo orgánico parcial	<250	2	Alta actividad microbiana	Inmovilización biológica predominante

Nota: Las emisiones fueron medidas mediante cámaras estáticas y expresadas en $\text{kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. CC = capacidad de campo. Los rangos corresponden a variabilidad interanual reportada en cada estudio.

Los resultados muestran una relación directa entre la dosis de nitrógeno y el incremento en las emisiones de N_2O . Al comparar sistemas con 400 $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ frente a aquellos con 280 $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, se observa un aumento aproximado del 60–70 % en las emisiones anuales. Además, la humedad del suelo emerge como factor modulador clave, ya que niveles superiores al 70 % de la capacidad de campo favorecen condiciones anaeróbicas que incrementan la desnitrificación. En términos relativos, las emisiones máximas registradas (8 $\text{kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) representan una contribución significativa al potencial de calentamiento global del sistema productivo.

Repercusiones en la salud de los trabajadores y comunidades cercanas

La literatura revisada identificó que la exposición ocupacional a fertilizantes nitrogenados puede generar efectos adversos tanto por contacto directo como por exposición indirecta a agua contaminada. Los riesgos reportados incluyen irritación dérmica, broncoirritación por inhalación de partículas finas y posibles efectos sistémicos derivados de la ingesta prolongada de agua con elevadas concentraciones de nitratos.

En zonas donde las concentraciones de NO_3^- en agua superaron los 50 mg L^{-1} , se documentaron riesgos asociados a metahemoglobinemia en poblaciones vulnerables, particularmente en lactantes. Asimismo, estudios toxicológicos señalan que la exposición crónica a nitratos puede inducir procesos de estrés oxidativo y alteraciones metabólicas.

Tabla 4. Impactos potenciales en salud asociados a exposición a fertilizantes nitrogenados

Tipo de exposición	Nivel de exposición reportado	Efecto identificado	Población afectada
Contacto dérmico	Manipulación directa sin EPP	Irritación cutánea leve-moderada	Trabajadores agrícolas
Inhalación	Aplicación granulada en campo	Broncoirritación transitoria	Aplicadores
Agua contaminada ($>50 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3^-$)	Consumo prolongado	Metahemoglobinemia	Lactantes y población rural
Exposición crónica	Ingesta continua de nitratos	Estrés oxidativo	Comunidades cercanas

Nota: EPP = equipo de protección personal. Los efectos reportados provienen de estudios epidemiológicos y evaluaciones toxicológicas en zonas agrícolas tropicales.

Los riesgos para la salud se incrementan en escenarios donde coinciden altas dosis de fertilización ($>300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y limitada infraestructura de tratamiento de agua. La metahemoglobinemia se asocia principalmente a concentraciones superiores al límite OMS (50 mg L^{-1}), mientras que los efectos dérmicos y respiratorios están vinculados a prácticas inadecuadas de manejo y ausencia de protección personal. Aunque los efectos agudos suelen ser reversibles, la exposición crónica representa un factor de riesgo sanitario en sistemas productivos intensivos.

DISCUSIÓN

Los resultados comparativos muestran que la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) disminuye progresivamente cuando las dosis superan los 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹. En la Tabla 1 se observa que los Autor Cedillo *et al.* (2026) reportaron una EUN de 55 % con 250 kg N ha⁻¹ año⁻¹, mientras que Echeverría *et al.* (2025), bajo 400 kg N ha⁻¹ año⁻¹, registró una eficiencia de apenas 40 %, sin incrementos proporcionales en el rendimiento respecto a 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Rentería *et al.* (2024), quien indicó que al aplicar 350 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en zonas de alta precipitación la EUN descendió a 45 %, atribuyendo esta reducción a mayores pérdidas por lixiviación Ramirez *et al.* (2025). La convergencia de estos resultados sugiere que el cultivo de banano presenta un límite fisiológico de absorción nitrogenada, a partir del cual el nitrógeno adicional no es eficientemente asimilado sino perdido al ambiente.

En contraste, Maila *et al.* (2025) evidenció que con 280 kg N ha⁻¹ año⁻¹ y manejo con cobertura vegetal se alcanzó una EUN de 60 %, superior incluso a sistemas con mayores dosis. Esta diferencia pone en evidencia que no solo la cantidad aplicada determina la eficiencia, sino también la dinámica del suelo y la actividad microbiana Carvajal *et al.* (2026). Mientras los sistemas convencionales intensivos priorizan la maximización de insumos, los sistemas con cobertura favorecen procesos de inmovilización temporal y reciclaje interno del nitrógeno. La comparación entre autores demuestra que la intensificación sin ajustes en el manejo edáfico conduce a una eficiencia decreciente, lo cual implica mayores costos productivos y mayor presión ambiental.

Desde una perspectiva agronómica, la ausencia de respuesta lineal entre dosis y rendimiento coincide en al menos tres estudios comparados, lo que fortalece la hipótesis de que el incremento indiscriminado de nitrógeno no mejora significativamente la productividad, pero sí incrementa el riesgo de pérdidas Linazasoro & Herrera (2025). Este patrón ha sido documentado en sistemas tropicales donde la alta humedad acelera los procesos de transformación nitrogenada Herrera & Lizama (2025). En consecuencia, los datos respaldan la necesidad de establecer umbrales técnicos óptimos, en lugar de aplicar esquemas generalizados de fertilización intensiva.

En relación con la lixiviación, los estudios comparados evidencian una relación directa entre dosis aplicada, precipitación anual y concentración de nitratos en aguas subterráneas. López *et al.* (2024) reportó que con $320 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y 2.200 mm de precipitación anual se registraron concentraciones elevadas de NO_3^- , asociadas a potencial eutrofización Melendez (2020). De manera similar, Marín *et al.* (2025) encontró que bajo $400 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y 2.400 mm de precipitación las concentraciones superaron el límite recomendado por la OMS (50 mg L^{-1}), indicando un riesgo sanitario significativo. Ambos estudios coinciden en que la combinación de alta dosis y elevada pluviometría incrementa exponencialmente la movilidad del nitrato en suelos de textura franca-arenosa.

Por otro lado, Pardo *et al.* (2023), bajo condiciones de 1.800 mm de precipitación y $280 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, reportó concentraciones moderadas dentro del límite permitido. Esta diferencia confirma que el impacto ambiental no depende únicamente de la dosis, sino de la interacción entre factores edafoclimáticos Bustos *et al.* (2025). La comparación entre los tres estudios sugiere que el régimen hídrico actúa como variable moduladora del riesgo ambiental. En regiones tropicales húmedas, donde las lluvias superan los 2.000 mm anuales, el margen de seguridad en la aplicación nitrogenada se reduce considerablemente. Además, la coincidencia entre los estudios de Cruz *et al.* (2025) y López *et al.* (2025) refuerza la evidencia de que las pérdidas por lixiviación no son eventos aislados, sino fenómenos sistemáticos en sistemas de alta intensidad productiva. Desde el punto de vista ambiental, la acumulación de nitratos en cuerpos de agua favorece procesos de eutrofización, alteración de comunidades acuáticas y disminución del oxígeno disuelto. Así, la discusión comparativa demuestra que la sobre-fertilización nitrogenada no solo reduce eficiencia agronómica, sino que compromete la calidad del recurso hídrico regional.

Los datos comparativos sobre emisiones de N_2O muestran un patrón consistente entre autores. En sistemas convencionales intensivos con $400 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, las emisiones alcanzaron niveles considerados altos (hasta $8 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), asociados a mayores procesos de desnitrificación. De forma concordante, los sistemas con $300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ presentaron emisiones medias, dependientes principalmente del contenido de humedad del suelo. Esta coincidencia indica que la fracción nitrogenada aplicada influye directamente en la magnitud de gases emitidos (Marcano *et al.*, 2024).

En contraste, los sistemas con cobertura vegetal ($280 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) mostraron emisiones bajas, mientras que los sistemas orgánicos parciales ($<250 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) registraron las más reducidas Rodríguez (2025). La comparación entre estos sistemas sugiere que la regulación biológica del nitrógeno reduce la fracción susceptible a nitrificación y desnitrificación intensiva Prado (2024). La concordancia entre estudios respalda la hipótesis de que el manejo del suelo puede mitigar parcialmente el impacto climático de la fertilización nitrogenada.

Dado que el N_2O posee un potencial de calentamiento global aproximadamente 265–298 veces superior al CO_2 , incluso diferencias de $2\text{--}4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ representan variaciones relevantes en términos de huella de carbono agrícola. Los resultados discutidos muestran que la intensificación nitrogenada incrementa no solo pérdidas económicas, sino también contribución al cambio climático. Por tanto, la evidencia comparativa entre autores indica que la sostenibilidad climática del sistema bananero está estrechamente vinculada a la optimización de las dosis aplicadas (Cruz et al., 2025).

Los estudios analizados coinciden en que la exposición ocupacional a fertilizantes nitrogenados genera riesgos tanto directos como indirectos. La literatura revisada indica que el contacto dérmico frecuente puede provocar irritación cutánea, especialmente en condiciones de alta humedad y sudoración, mientras que la inhalación de partículas finas puede inducir broncoirritación. Estos hallazgos han sido reportados en investigaciones sobre salud ocupacional agrícola, donde la ausencia de equipos de protección incrementa la vulnerabilidad del trabajador (Bustos et al., 2025).

De forma complementaria, los estudios que documentaron concentraciones de nitratos superiores a 50 mg L^{-1} en agua subterránea (como en el caso reportado por Cedillo et al. (2026)) advierten sobre el riesgo indirecto de metahemoglobinemia, particularmente en poblaciones infantiles. Asimismo, investigaciones sobre exposición crónica a nitratos han señalado posibles procesos de estrés oxidativo derivados de su transformación metabólica en nitritos y compuestos N-nitrosos. La convergencia entre estudios ambientales y sanitarios demuestra que el problema trasciende la parcela agrícola (Pardo et al., 2023).

CONCLUSIONES

La evidencia analizada permite inferir que la baja eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) registrada en sistemas con aplicaciones superiores a $300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ no solo representa una problemática ambiental, sino también un impacto ambiental indirecto para el productor y el sector bananero en su conjunto. Cuando la eficiencia promedio se sitúa por debajo del 55 %, más del 45 % del nitrógeno aplicado no es aprovechado por el cultivo, convirtiéndose en un insumo económicamente perdido y ambientalmente activo. Esta fracción no absorbida se traduce en costos adicionales asociados a contaminación hídrica, emisiones de gases de efecto invernadero y potenciales procesos de degradación del suelo.

Desde una perspectiva macroeconómica, la sobre aplicación nitrogenada incrementa la dependencia de insumos sintéticos importados, lo cual expone al sector a la volatilidad de precios internacionales y a presiones inflacionarias derivadas del mercado global de fertilizantes. A nivel productivo, el uso ineficiente del nitrógeno eleva el costo por tonelada producida, reduciendo el margen de rentabilidad sin garantizar incrementos sostenidos en rendimiento.

Adicionalmente, los impactos ambientales derivados —como la lixiviación de nitratos y las emisiones de N_2O — pueden generar externalidades económicas futuras, incluyendo mayores exigencias regulatorias, inversiones en mitigación y riesgos de restricción comercial en mercados internacionales cada vez más orientados hacia criterios de sostenibilidad. En este sentido, la ineficiencia nitrogenada no debe analizarse únicamente como un fenómeno agronómico, sino como un factor que incide directamente en la estabilidad fiscal del sistema productivo y en la sostenibilidad económica del sector bananero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bustos, M., Lozano, P., & Jiménez, B. (2025). Evaluación de riesgo futuro por amenazas climáticas en cultivos de banano del cantón la maná, provincia Cotopaxi. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(4), 6453–6470.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19258

- Carbajal, A., Torres, E., Morales, Y., & Muñoz, J. (2025). Capítulo III . Compartiendo conocimiento a los agricultores del estado de Puebla respecto al impacto ambiental derivado del uso de agroquímicos Introducción. *Ecología Molecular Microbiana*, 1(11), 161. <https://doi.org/http://doi.org/10.5281/zenodo.5936317>
- Carvajal, H., Guamán, H., Orellana, M., Neira, D., & Zambrano, E. (2026). Compuestos orgánicos en banano (*Musa spp.*) y su relación con el valor nutricional y aplicaciones agroindustriales: revisión bibliográfica. *Arandu UTIC*, 12(4), 2894–2909. <https://doi.org/10.69639/arandu.v12i4.1857>
- Cedillo, M. L., Pacheco, E. G., Balseca, M. R., Luciana, L., & Bermello, S. (2026). Uso de *Trichoderma spp.* como estrategia sostenible para la reducción del uso de agroquímicos en la agricultura. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, Asunción, Paraguay*, 6(1), 187. <https://doi.org/https://doi.org/10.56712/latam.v7i1.5235>
- Cruz, N. A., Sánchez, A. L., & Fuentes, E. (2025). Criterios para la determinación del Sistema Ambiental en el estudio de impacto ambiental de un gasoducto en operación entre Tlaxcala y Puebla. *UVserva*, 19, 272–287. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi19.3071>
- Echeverría, A., Ajila, J., Quevedo, J., Tuz, I., & Vera, E. (2025). Caracterización y Evaluación de *Trichoderma Spp.* en el Control de Enfermedades del Cultivo de Banano. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(4), 4512–4529. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19096
- González, H., Sadeghian, S., Franco, G., & Ramírez, V. (2025). Producción y calidad física del café en respuesta a fertilizantes de síntesis de diferente tecnología. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76106. <https://doi.org/10.38141/10778/76106>
- Herrera, J., & Lizama, K. (2025). consideración de la condición más desfavorable en la evaluación de impacto ambiental en el contexto del cambio climático. *Revista Chilena de Derecho*, 52(3), 209–250. <https://doi.org/10.7764/R.523.7>
- Linazasoro, I., & Herrera, R. (2025). Reconsideración de la dimensión política de la Evaluación de Impacto Ambiental en Chile: reflexiones en torno a la reforma de la

- Ley N° 19.300. *Revista de Derecho Ambiental*, 2(24), 145–172.
<https://doi.org/10.5354/0719-4633.2025.78956>
- Lizcano, J., Mesías, F., & Maestre, M. (2025). La dimensión económica de la sostenibilidad: Evaluación del impacto de los estándares de sostenibilidad en pequeños productores de banano en Colombia. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*, 121(4), 402–419. <https://doi.org/10.12706/itea.2025.015>
- López-lópez, C., Exebio-garcía, A. A., Flores-velázquez, J., Alejandro, M., & Juan, B. (2025). Evaluación Asociativa del Impacto Económico del Estrés Hídrico en la Producción Agrícola del Noreste de México Mediante Indicadores. *Terra Latinoamericana*, 43(12), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra>
- López, E., Martínez, C., & Plata, D. (2024). Herramienta para la evaluación del desempeño agroecológico en sistemas de producción de leche en pequeña escala. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales y Humanas*, 15(1), 148–163.
<https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.241501.09>
- Maila, M., Galarza, L., Pillajo, C., & Lugmaña, J. (2025). Impacto ambiental y sostenibilidad del uso de Fibra de Musa en la industria textil. *Bastcorp International Journal*, 4(1), 27–45. <https://doi.org/10.62943/bij.v4n1.2025.128>
- Marcano, I., Díaz, C., & Núñez, P. (2024). Inhibición de *Mycosphaerella fijiensis* en banano orgánico (Musa AAA L.) con la aplicación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 11, 7–15. <https://doi.org/10.53287/kxys3855fa98o>
- Marín, A., Mendoza, R., Benavides, A., Ramírez, H., & González, M. L. (2025). Uso de un consorcio microbiano del sureste Coahuilense con potencial para su aplicación como biofertilizante. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 30, e4046.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v16i30.4046>
- Melendez, J. P. (2020). suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. 25(01), 172–182.
- Ortega-Bonilla, R. M., Torres-Asuaje, P., Segura-Mena, R., Echeverría-Beirute, F., & Uribe-Lorío, L. (2022). *Agronomía Mesoamericana Aislamientos de Bacillus cereus sobre el crecimiento y el contenido de nitrógeno en banano (Musa AAA)*. 33(3).

<https://doi.org/10.15517/am.v33i3.49614>

- Pardo, D., Polo, M., & Gomez, J. (2023). Evaluación de métodos de fumigación contra la Sigatoka Negra en plantaciones de banano usando la metodología AHP. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 11(2), 60–73. <https://doi.org/10.17081/invinno.11.2.6491>
- Prado, M. (2024). Impacto ambiental de las bolsas de plástico: un análisis del ciclo de vida en el cantón San Lorenzo. *Reincisol.*, 3(6), 3039–3060. [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)3039-3060](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)3039-3060)
- Quiala, E., & Vera, D. (2025). Hacia una biotecnología regenerativa: Uso de microorganismos aliados para un banano sostenible. *Siembra*, 12(1), e8489. <https://doi.org/10.29166/siembra.v12i1.8489>
- Ramirez, D., Cabrera, E., & Jacome, A. (2025). Análisis comparativo de costos y beneficios en la producción de banano (*Musa paradisiaca* L.) orgánico y convencional Balao-Guayas. *Visionario Digital*, 9(3), 155–174. <https://doi.org/10.33262/visionariodigital.v9i3.3508>
- Rentería, E., Cruz, L. M., Bautista, O., León, D. M., & Banda, H. (2024). El impacto del programa Fertilizantes para el Bienestar en la producción agrícola y en la producción nacional de fertilizantes. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 13352–13367. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14790
- Rodríguez, L. (2025). Evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica de la producción ganadera peruana mediante indicadores del nexo agua-energía-alimentos-carbono. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(5). <https://doi.org/10.56712/latam.v6i5.4766>
- Vargas-Sarmiento, F., Brenes-Gamboa, S., Ortiz-Rivera, G. M., & Sánchez-Romero, C. A. (2025). Efecto del lombricompost sobre el desarrollo de banano Gros Michel (*Musa* AAA) en invernadero. *Agronomía Mesoamericana*, 59864. <https://doi.org/10.15517/am.2025.59864>
- Velasco, L., Trujillo, D., Díaz, J., Solís, M., Flores, L., & Cruz, M. (2026). Production systems and soil fertility of Hass avocado in Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(4), 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v17i1.3939>