

Influencia de las micorrizas arbusculares en la calidad ambiental del suelo de plantaciones de cacao bajo diferentes esquemas de fertilización.

Influence of arbuscular mycorrhizae on soil environmental quality in cocoa plantations under different fertilization schemes.

Influência das micorrizas arbusculares na qualidade ambiental do solo de plantações de cacau sob diferentes regimes de fertilização.

Prieto Benavides, Oscar Oswaldo
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
oprieto@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4101-0523>



Kaiser Flores, Annelys Jamilexy
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
annelys.kaiser2015@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-8978-9795>



Kaiser Flores, Berenice Jurley
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
berenice.kaiser2016@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-6086-0769>



Pilozo Jimenez, Kerly Katuska
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
kerlykatynet@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-9901-123X>



Hernández Cajas, José Darío
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Jose.hernandez_95@icloud.com
<https://orcid.org/0009-0002-5854-3641>



 DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n2/576>

Como citar:

Prieto Benavides, O. O., Kaiser Flores, A. J., Kaiser Flores, B. J., Pilozo Jimenez, K. K., & Hernández Cajas, J. D. (2024). Influencia de las micorrizas arbusculares en la calidad ambiental del suelo de plantaciones de cacao bajo diferentes esquemas de fertilización. *Código Científico Revista De Investigación*, 5(2), 679–696. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n2/576>.

Recibido: 26/10/2024

Aceptado: 19/11/2024

Publicado: 31/12/2024

Resumen

Este estudio evaluó la calidad ambiental del suelo en seis fincas cacaoteras de la provincia de Los Ríos, Ecuador, enfocándose en las características fisicoquímicas del suelo y la ecología de las micorrizas arbusculares como bioindicadores. Se recolectaron 60 muestras de suelo y raíces para determinar las propiedades fisicoquímicas e identificar las micorrizas arbusculares presentes. Los métodos estadísticos empleados incluyeron análisis descriptivos, inferenciales para evaluar la influencia de la fertilización en los parámetros ecológicos de las micorrizas, y multivariados para correlacionar las características del suelo con la ecología de las micorrizas. Los resultados mostraron que la riqueza de especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) no variaba significativamente entre fincas con y sin fertilización ($p: 0.9936$), y que los suelos fertilizados presentaron mayor dominancia de ciertos géneros de hongos. La matriz de Leopold reveló que las actividades con mayor impacto ambiental negativo incluían la preparación del terreno y la aplicación de productos fitosanitarios, mientras que la generación de empleo fue el aspecto ambiental más significativo. Este estudio demuestra que las prácticas agrícolas en las fincas cacaoteras afectan tanto positiva como negativamente la biodiversidad del suelo, alterando la riqueza y diversidad de microorganismos benéficos como los HMA.

Palabras clave: Microorganismos del suelo, manejo agronómico, microbiota del suelo, sostenibilidad agrícola.

Abstract

This study evaluated the environmental quality of the soil in six cocoa farms in the province of Los Ríos, Ecuador, focusing on the physicochemical characteristics of the soil and the ecology of arbuscular mycorrhizae as bioindicators. Sixty soil and root samples were collected to determine the physicochemical properties and identify the arbuscular mycorrhizae present. Statistical methods employed included descriptive, inferential analyses to evaluate the influence of fertilization on mycorrhizal ecological parameters, and multivariate analyses to correlate soil characteristics with mycorrhizal ecology. The results showed that the species richness of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) did not vary significantly between farms with and without fertilization ($p: 0.9936$), and that fertilized soils showed higher dominance of certain fungal genera. The Leopold matrix revealed that the activities with the greatest negative environmental impact included land preparation and application of phytosanitary products, while employment generation was the most significant environmental aspect. This study demonstrates that agricultural practices on cocoa farms both positively and negatively affect soil biodiversity by altering the richness and diversity of beneficial microorganisms such as AMF.

Keywords: Soil microorganisms, agronomic management, soil microbiota, agricultural sustainability.

Resumo

Este estudo avaliou a qualidade ambiental do solo em seis explorações de cacau na província de Los Ríos, Equador, centrando-se nas características físico-químicas do solo e na ecologia das micorrizas arbusculares como bioindicadores. Foram recolhidas 60 amostras de solo e de raízes para determinar as propriedades físico-químicas e identificar as micorrizas arbusculares presentes. Os métodos estatísticos utilizados incluíram análises descritivas e inferenciais para

avaliar a influência da fertilização nos parâmetros ecológicos micorrízicos e análises multivariadas para correlacionar as características do solo com a ecologia micorrízica. Os resultados mostraram que a riqueza de espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) não variou significativamente entre explorações com e sem fertilização ($p: 0,9936$), e que os solos fertilizados apresentaram uma maior dominância de certos géneros de fungos. A matriz de Leopold revelou que as actividades com maior impacto ambiental negativo incluíam a preparação do terreno e a aplicação de produtos fitofarmacêuticos, enquanto a geração de emprego era o aspeto ambiental mais significativo. Este estudo demonstra que as práticas agrícolas nas explorações de cacau afectam tanto positiva como negativamente a biodiversidade do solo, alterando a riqueza e a diversidade de microrganismos benéficos como os FMA.

Palavras-chave: Microrganismos do solo, gestão agronómica, microbiota do solo, sustentabilidade agrícola.

Introducción

El cacao se cultiva en más de 10 millones de hectáreas en los países tropicales, con una producción mundial superior a 4 millones de toneladas (Guanuche *et al.*, 2024). En Ecuador, la producción de cacao es fundamental para la economía, alcanzando exportaciones de USD 1.171 millones en 2023. Sin embargo, enfrenta desafíos significativos debido a la falta de apoyo a los agricultores, lo que afecta la cantidad y calidad del producto (Ponce, 2023).

Las plantaciones de cacao, especialmente en monocultivo, dependen de fertilizantes químicos para mantener la productividad, pero su uso intensivo plantea serias preocupaciones ambientales (Molina *et al.*, 2021). Este modelo agrícola intensivo, aunque inicialmente incrementa los rendimientos, tiene efectos adversos para la salud y el ambiente, además de que su efectividad disminuye con el tiempo (Calderón *et al.*, 2019).

En este contexto, se requieren prácticas de manejo que contribuyan a la protección y recuperación del suelo, y que aseguren la sostenibilidad del cultivo de cacao (Molina *et al.*, 2021). Sin embargo, el impacto de los fertilizantes químicos en las comunidades microbianas del suelo sigue siendo un tema de debate; mientras algunos estudios indican alteraciones significativas en las poblaciones de hongos y bacterias, otros destacan la importancia de los

microorganismos del suelo como indicadores clave de prácticas de manejo sostenible (Ortiz *et al.*, 2020).

El uso continuo de fertilizantes químicos contribuye a la salinización, compactación del suelo y disminución de la actividad microbiana, agravando los problemas ambientales y aumentando los costos de producción. Como alternativa, el uso de microorganismos dentro de la agricultura sostenible ofrece una opción viable para mantener la productividad y la salud del suelo (Wahab *et al.*, 2023).

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son esenciales en este contexto, ya que mejoran la absorción de nutrientes y la tolerancia de las plantas a condiciones adversas como fósforo y agua, aumentando la tolerancia de las plantas a estresantes abióticos como la sequía, salinidad y toxicidad de metales (Robdrup *et al.*, 2024).

Este estudio tiene como objetivo evaluar los efectos de los fertilizantes químicos y orgánicos en la calidad del suelo en plantaciones de cacao en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Se analizan las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, enfocándose en la ecología de los HMA y otros parámetros de calidad, para determinar cómo las diferentes prácticas de fertilización influyen en la sostenibilidad y productividad de las plantaciones de cacao.

Metodología

El estudio se realizó en seis fincas cacaoteras ubicadas en los cantones de Quevedo, Buena Fe, Valencia, La Maná, y Mocache, en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Esta región se caracteriza por un clima tropical húmedo, con una temperatura promedio anual de 24°C y una precipitación anual de 2,800 mm. Las fincas seleccionadas varían en tamaño, prácticas de manejo y uso de fertilizantes, lo que permitió una evaluación comparativa de las condiciones del suelo bajo diferentes regímenes de fertilización.

Se recolectaron 60 muestras para determinar sus características fisicoquímicas y 60 muestras de raíces para analizar la colonización de Micorrizas Arbusculares (HMA). Las muestras fueron procesadas en el laboratorio de Biotecnología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, utilizando claves taxonómicas actualizadas para la identificación de HMA.

La extracción de esporas de HMA se realizó mediante tamizado húmedo y centrifugación en gradiente de sacarosa. Posteriormente, las esporas se clasificaron en morfotipos basados en características morfológicas como tamaño, color y ornamentación de la pared. Posteriormente, se montaron en láminas para su análisis bajo microscopio compuesto, usando el reactivo Melzer y las claves taxonómicas para la identificación. Esto permitió una evaluación detallada de la diversidad y densidad de HMA en las muestras.

Las muestras de suelo fueron analizadas para determinar su textura y parámetros químicos como pH, materia orgánica, y nutrientes esenciales como P, K, Ca, entre otros. Paralelamente, se evaluaron la colonización micorrízica en las raíces de cacao mediante técnica de clareo y tinción, seguido de la observación microscópica para determinar la presencia de estructuras fúngicas.

Se llevó a cabo un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) utilizando la Matriz de Leopold, que permitió identificar y cuantificar los impactos directos e indirectos de las prácticas de fertilización en las fincas cacaoteras. Esta matriz evaluó la magnitud, duración y reversibilidad de los impactos observados en los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos del área de estudio.

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando métodos estadísticos descriptivos e inferenciales. Se realizaron análisis de correlación y regresión lineal para determinar la relación entre los parámetros fisicoquímicos del suelo y la colonización micorrízica. Además, se emplearon técnicas multivariadas, como el Análisis de Redundancia (RDA) para correlacionar las variables fisicoquímicas con la ecología de los HMA, y el Análisis de Similitud (ANOSIM)

para evaluar las diferencias entre comunidades de HMA en suelos con y sin fertilización. El software utilizado para estos análisis fue RStudio versión 4.0.2.

Resultados

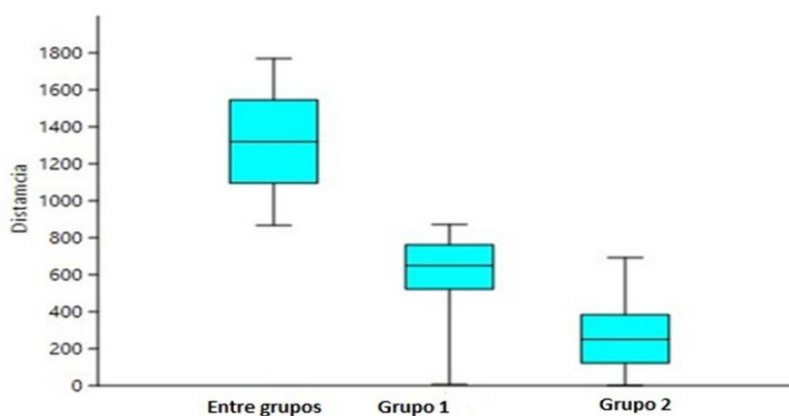
1.1. Identificación y Conteo de Géneros de HMA

En este estudio se identificaron siete géneros de HMA en las muestras de suelo de seis fincas cacaoteras: *Glomus*, *Acaulospora*, *Scutellospora*, *Rhizophagus*, *Gigaspora*, *Ambispora*, y *Diversispora*. Estos géneros se encontraron en todos los sitios de muestreo, aunque con variaciones significativas en la cantidad de esporas, según la aplicación de fertilizantes químicos. Las fincas sin fertilización química mostraron un número notablemente mayor de esporas, alcanzando un total de 3075.

La riqueza de géneros de HMA en las fincas estudiadas mostró diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización y no fertilización (ANOSIM p: 0.0001). La prueba PERMANOVA indicó que existen diferencias significativas entre los tratamientos, lo cual es consistente con la variabilidad ecológica de la región central del trópico húmedo ecuatoriano (Figura 1).

Figura 1

Resultado de la prueba ANOSIM para la riqueza de géneros de HMA en fincas con y sin fertilización.

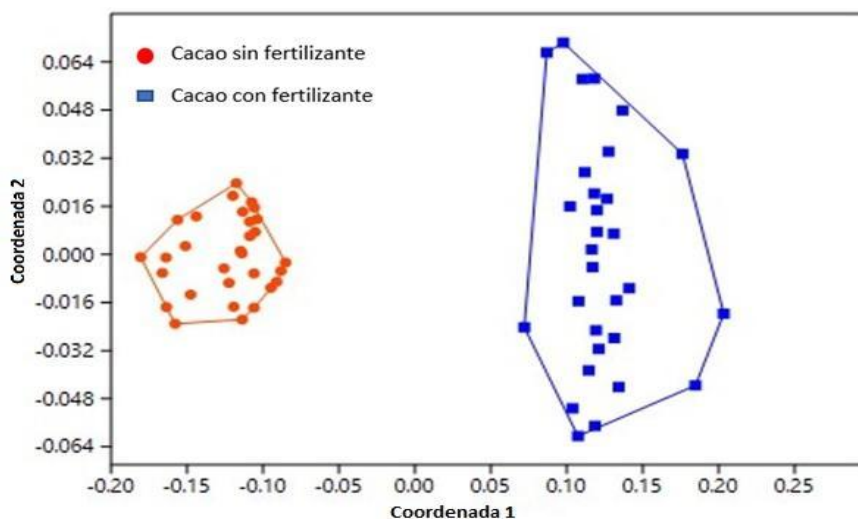


Nota: Autores (2024).

Además, se aplicó un análisis de distancia NMDS con los valores de riqueza de los tratamientos, en el que se identificaron dos agrupaciones separadas (Stress = 0.16; R^2 eje1 = 0.92; R^2 eje2 = 0.03). Este análisis demuestra que existen diferencias estadísticas significativas en la diversidad de HMA presentes en los suelos de las fincas cultivadas con cacao nacional con y sin la aplicación de fertilizantes (Figura 2).

Figura 2

Análisis de distancias NMDS de HMA en fincas con y sin fertilización.



Nota: Autores (2024).

La correlación entre los parámetros fisicoquímicos del suelo y la colonización micorrízica fue significativa, con coeficientes de correlación de 0.94 para fincas con fertilización, excepto la relacionada con la arcilla. En contraste para las fincas sin fertilización, el coeficiente de correlación fue de 0.81, también significativo ($p = 0.001$), mostrando diferencias estadísticas significativas en los parámetros de arcilla, fósforo (P), calcio (Ca), boro (B) y manganeso (Mn).

1.2. Riqueza y Diversidad de Individuos de HMA en Fincas Cultivadas con Cacao Nacional con y sin Fertilización

La prueba Mann-Whitney mostró diferencias significativas en la riqueza de individuos entre los dos grupos; con y sin la aplicación de fertilizantes ($W = 900,0$; valor- $P = 2,99445E-$

11) (Tabla 1). Las fincas sin aplicación de fertilizantes presentaron una mayor riqueza de individuos de HMA, con un promedio de 593,267, en contraste con las fincas que sí aplicaron fertilización, que mostraron un promedio de 261,233.

Tabla 1

Análisis de riqueza de individuos de HMA en seis fincas cultivadas con cacao tipo nacional con y sin la aplicación de fertilizantes.

	Riqueza de HMA con fertilizantes	Riqueza de HMA sin fertilizante
Recuento	30	30
Promedio	261,233	593,267
Mediana	266,0	585,0
Desviación Estándar	21,2371	37,2937
Coeficiente de Variación	8,12954%	6,28617%
Error Estándar	3,87734	6,80887
Mínimo	206,0	526,0
Máximo	304,0	666,0
Rango	98,0	140,0

Nota: Autores (2024).

El análisis de diversidad de individuos de HMA también reveló diferencias significativas. La prueba Mann-Whitney mostró una mayor diversidad en suelos sin la aplicación de fertilizantes ($W = 877.0$, valor- $P = 2.78305E-10$) (Tabla 2).

Tabla 2

Análisis de la diversidad de individuos de HMA en seis fincas cultivadas con cacao tipo nacional con y sin la aplicación de fertilizantes.

	Diversidad de HMA con fertilizante	Diversidad de HMA sin fertilizante
Recuento	30	30
Promedio	1,91003	1,93477
Mediana	1,91	1,9345
Desviación Estándar	0,0124166	0,00404017

Coefficiente de Variación	0,650071%	0,20882%
Error Estándar	0,00226695	0,000737631
Mínimo	1,887	1,928
Máximo	1,934	1,942
Rango	0,047	0,014

Nota: Autores (2024).

El análisis de dominancia de individuos de HMA en los suelos de las seis fincas cultivadas con cacao nacional mostró que las fincas con aplicación de fertilizantes presentaron una mayor dominancia de géneros de HMA ($W = 24,0$; valor- $P = 3.13882E-10$) en comparación con las fincas sin fertilización (Tabla 5).

Tabla 3

Análisis de la dominancia de individuos de HMA en seis fincas cultivadas con cacao tipo nacional con y sin la aplicación de fertilizantes.

	Dominancia de HMA con fertilizante	Dominancia de HMA sin fertilizante
Recuento	30	30
Promedio	0,152987	0,14601
Mediana	0,15285	0,146
Desviación Estándar	0,00366848	0,00117513
Coefficiente de Variación	2,39791%	0,804829%
Error Estándar	0,00066977	0,000214548
Mínimo	0,1459	0,144
Máximo	0,162	0,148
Rango	0,0161	0,004

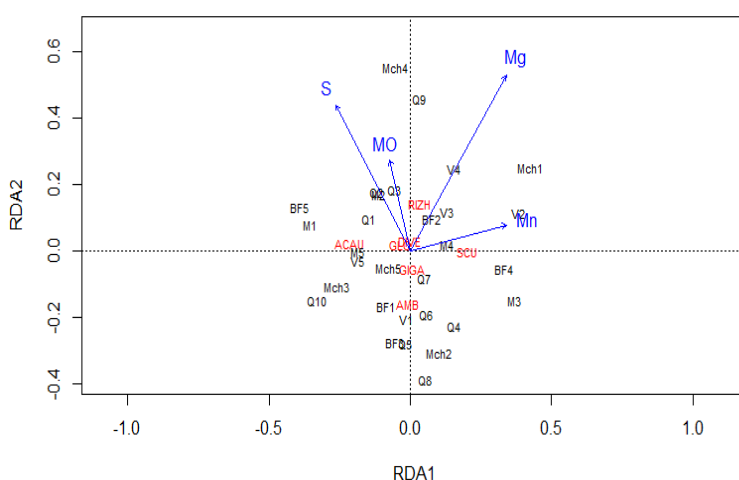
Nota: Autores (2024).

1.3. Correlación entre parámetros físico-químicos del suelo con densidad y riqueza de especies de HMA:

El modelo de RDA fue significativo, con un coeficiente de determinación de 0.589112. La mayoría de los parámetros descriptores presentaron valores de VIF menores a 5, excepto el pH. El análisis de colinealidad step forward identificó que las variables Mg, S, Mn y materia orgánica (M.O.) eran las principales correlacionadas positivamente con los géneros de HMA *Rhizopagus*, *Glomus*, *Scutellospora* y *Acaulospora*).

Figura 3

Análisis de Redundancia (RDA) entre parámetros físico-químicos del suelo con densidad y riqueza de especies de HMA.

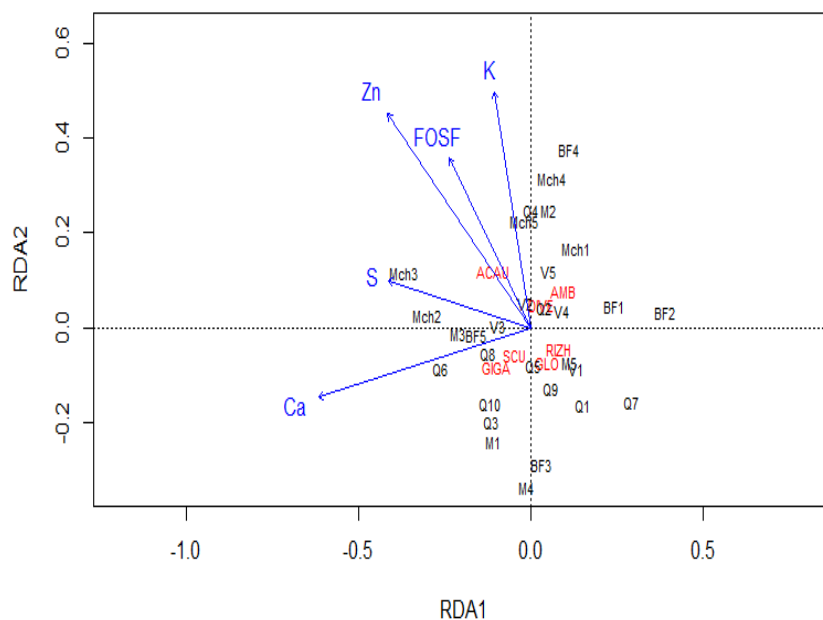


Nota: Autores (2024).

El análisis de redundancia (RDA) para las fincas sin aplicación de fertilizantes no fue significativo, presentando un coeficiente de determinación de 0.61. Sin embargo, el análisis de colinealidad step forward determinó que los parámetros P, K, Ca, S y Zn estaban positivamente correlacionados con los géneros *Acaulospora*, *Gigaspora* y *Scutellospora*.

Figura 4

Análisis de Redundancia (RDA) entre parámetros físico-químicos del suelo con densidad y riqueza de especies de HMA.



Nota: Autores (2024).

1.4. Identificación de los Impactos Ambientales Generados en la Producción de Cacao Nacional

La evaluación de los impactos ambientales en la producción de cacao nacional, en fincas con y sin fertilización, presentada en la Figura 5. Reflejó que las actividades de preparación del terreno, control de maleza y aplicación de productos fitosanitarios fueron las más perjudiciales, afectando significativamente la seguridad y salud ocupacional, la erosión y la calidad del suelo, la calidad del agua y la biodiversidad por la presencia de desechos. En contraste, el manejo de insectos benéficos y la generación de empleo representaron los principales impactos positivos, mejorando la calidad de vida de la población y la infraestructura de servicios públicos.

Figura 5

Magnitudes del impacto ambiental en la producción de cacao nacional en fincas con y sin fertilización.

ACTIVIDADES - ACCIONES		MATRIZ DE MAGNITUDES DE IMPACTO (M)														Magnitud total de impacto sobre la actividad respectiva	Numeros de impactos positivos	Numeros de impactos negativos	Numeros de impactos neutros		
		AIRE		AGUA		SUELO		FLORA		FAUNA		SOCIAL									
COMPONENTES AMBIENTALES		Calidad de aire/ emisiones	Niveles de ruido y vibraciones	Calidad de agua superficial	Calidad de agua subterránea	Erosión/ estabilidad	Afectación de habitats	Calidad del suelo con presencia de desechos	Flora terrestre	Flora acuática	Flora terrestre	Flora acuática	Generación de empleo	Calidad visual y Paisaje	Seguridad y salud ocupacional	Infraestructura y servicios publico	Calidad de vida de población				
ESTABLECIMIENTO DE CULTIVOS	REPÁRACION DEL TERRENO PARA LA SIEMBR	-2,2	-1,4	-1,4	-1,4	-1,8	-2,2	-1,4	-2,2	-0,2	-2,2	-0,2	2,2	-1,8	-1,4	0	1,0	-16,4	3,0	13,0	0,0
	SIEMBR	-1,4	-1,4	-1,0	-1,0	-1,8	-2,2	-1,4	-2,2	0,0	-2,2	0,0	2,2	-1,8	-1,4	0	1,0	-14,4	3,0	11,0	2,0
	SOMBRA TEMPORAL	-1,4	-1,4	-1,0	-1,0	-1,8	-2,2	-1,4	-2,2	0,0	-2,2	0,0	2,2	-1,8	-1,4	0	1,0	-14,8	3,0	11,0	2,0
MANEJO AGRONÓMICO	CONTROL DE MALEZA	-2,2	-1,8	-1,0	0,0	-2,2	-2,2	-1,4	-2,8	-0,8	-2,8	-0,8	2,8	-2,2	-1,8	0,8	1,0	-17,0	3,0	12,0	1,0
	RIEGO	0,0	-1,8	-2,2	-2,2	-2,2	-1,8	0,0	-1,4	-1,8	-1,0	-1,8	2,8	-1,4	-1,8	1,0	1,0	-14,8	3,0	11,0	2,0
	FERTILIZACIÓN	0,0	-1,8	-1,8	-1,8	-2,8	-2,8	-2,8	-1,4	-1,8	-1,4	-1,4	-2,0	0,0	-1,8	1,0	1,0	-18,0	3,0	11,0	2,0
	PODA	-2,2	-2,2	0,0	0,0	-1,8	0,0	-1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	-2,2	1,8	0,0	-8,6	2,0	5,0	5,0
CONTROL FITOSANITARIO	APLICACIÓN DE PRODUCTOS FITOSANITARIO	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-2,0	-1,8	-1,8	-1,2	-1,2	-1,8	-1,8	2,4	0,0	-2,0	1,0	0	-15,6	3,0	12,0	1,0
	MANEJO DE INSECTOS BENEFICOS	0,0	-1,2	0,0	0,0	-2,0	0,0	-2,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	-2,0	1,0	2,0	3,2	7,0	2,0	7,0	
COSECHA	COSECHA	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,8	-1,8	-1,4	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	-2,2	0,0	0,0	-6,4	1,0	5,0	10,0	
	QUEBRADO DE LA MAZORCA	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,8	-1,8	-1,4	-1,8	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	-2,2	0,0	0,0	-5,2	1,0	5,0	10,0
EVALUACION Y COSECHA	FERMENTACION	-1,8	-1,8	-1,4	-1,4	-1,8	-1,4	-1,8	-1,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	-2,2	0,0	0,0	-12,0	1,0	3,0	6,0
	SECADO	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,8	-0,8	-1,8	-0,8	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	-1,8	0,0	0,0	-2,8	1,0	5,0	10,0
	ALMACENAMIENTO Y SELECCIÓN DE GRANOS	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,8	-0,8	-1,8	-0,8	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	-1,8	0,0	0,0	-2,8	1,0	5,0	10,0
	TRANSPORTE	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,4	-1,0	-1,4	-1,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	-1,8	0,0	0,0	-3,6	1,0	5,0	10,0
MAGNITUD TOTAL DEL IMPACTO SOBRE EL COMPONENTE AMBIENTAL RESPECTIV		-12,8	-1,6	-11,4	-10,4	-21,8	-20,0	-22	-17,6	-4,8	-11,2	-5,6	37	-9,0	###	8	8,0	-139,2			
VALORACION DE IMPACTOS POSITIVOS		0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	15,0	0,0	0,0	3,0	8,0	36,0			
VALORACION DE IMPACTOS NEGATIVOS		7,0	10,0	8,0	7,0	14,0	13,0	13,0	13,0	5,0	7,0	5,0	0,0	5,0	15,0	0,0	0,0	122,0			
																36,0	122,0	82,0			
		Simbología: Peso del factor Intensidad, W_i : 0,40 Peso del factor Extensión, W_e : 0,40 Peso del factor Duración, W_d : 0,20														Identificación por colores:		Impactos negativos Impactos positivos No impactos, neutro			

Nota: Autores (2024).

Además, se observó que la mayoría de las interacciones ambientales fueron neutras. Sin embargo, actividades como el establecimiento de cultivos y el control fitosanitario presentaron impactos de escala media. La generación de empleo fue identificada como el impacto ambiental de mayor significancia. Por otro lado, las actividades de riego y fertilización ejercieron una alta presión sobre la calidad del agua y del suelo, respectivamente.

Discusión

Los resultados mostraron una mayor abundancia de esporas de HMA en fincas sin fertilización química, alcanzando un total de 3075 esporas, significativamente superior a los 2028 y 1712 esporas reportados por Prieto *et al.* (2012) en suelos agroforestales de cacao. Esta diferencia sugiere que la ausencia de fertilización química favorece un ambiente más propicio para el desarrollo de HMA, posiblemente debido a menores niveles de contaminantes y una mayor disponibilidad de nutrientes orgánicos. Además, la presencia de tres géneros adicionales (Rhizophagus, Ambispora y Diversispora) en este estudio indica una mayor

diversidad micorrízica, lo que podría estar relacionado con las prácticas agrícolas específicas y las condiciones edáficas particulares de las fincas estudiadas, alineándose con los hallazgos de Arévalo (2016) sobre la variabilidad de comunidades bióticas en regiones con suelos diversos.

La riqueza de géneros de HMA en fincas sin fertilización fue significativamente mayor, corroborando estudios previos como el de Pineda *et al.* (2020), quienes también encontraron una menor riqueza en suelos con alta concentración de cadmio. Esta reducción en la riqueza y diversidad de HMA en fincas fertilizadas puede atribuirse a la alteración de parámetros fisicoquímicos del suelo, como el pH y la disponibilidad de nutrientes, que son críticos para la simbiosis micorrízica. Millar y Bennett (2016) destacaron que una alta disponibilidad de macro y micronutrientes puede imponer condiciones de estrés continuo que modifican la estructura de la comunidad de HMA, lo que explica la menor riqueza observada en las fincas fertilizadas.

Adicionalmente, Varma (2008) destaca que factores como la historia de manejo y las interacciones interespecíficas e intraespecíficas influyen en la distribución de HMA. Esto sugiere que la fertilización química no solo afecta la química del suelo, sino que también puede alterar las dinámicas ecológicas y las relaciones entre especies dentro de las comunidades de HMA, reduciendo así su diversidad micorrízica.

Los análisis PERMANOVA y ANOSIM confirmaron que las fincas sin fertilización presentan significativamente mayor riqueza y diversidad de HMA, lo que podría implicar una mayor estabilidad y resiliencia del ecosistema del suelo. Este hallazgo concuerda con Pineda *et al.* (2020), quienes reportaron una disminución en la riqueza y diversidad de HMA en suelos con alta concentración de cadmio, asociado a la fertilización química. Además, Vogel-Mikuš *et al.* (2005) y Hassan *et al.* (2011) observaron niveles reducidos de riqueza y diversidad de HMA en suelos afectados por actividades antropogénicas y fertilización descontrolada, corroborando la influencia negativa de estos factores sobre las comunidades micorrízicas.

La correlación significativa entre los parámetros fisicoquímicos del suelo y la colonización micorrízica subraya la influencia de factores como la acidez, materia orgánica, fósforo y potasio en la simbiosis HMA. Estos resultados son coherentes con Hernández-Hernández *et al.* (2017), quienes demostraron que las concentraciones de estos nutrientes interfieren en el establecimiento y desempeño de la simbiosis micorrízica. En fincas con fertilización, la positiva correlación de Mg, S, Mn y materia orgánica con géneros específicos de HMA sugiere que ciertos nutrientes favorecen la presencia de estos hongos, apoyando la idea de Toro *et al.* (2008) sobre el papel de HMA en la movilización de nutrientes esenciales como el azufre.

El análisis de dominancia reveló una mayor predominancia de ciertos géneros de HMA en fincas fertilizadas, lo que indica un ambiente más perturbado donde pocas especies predominan sobre otras. Este patrón de dominancia es un indicio de menor equitatividad en la distribución de géneros, lo que puede comprometer las funciones ecológicas de los HMA, como la mejora de la absorción de nutrientes y la protección contra patógenos. Millar y Bennett (2016) señalaron que una mayor dominancia suele estar asociada con una menor diversidad, lo que afecta negativamente la estabilidad y resiliencia del ecosistema del suelo.

El análisis de redundancia (RDA) reveló que en fincas fertilizadas, los parámetros Mg, S, Mn y materia orgánica están positivamente correlacionados con géneros específicos de HMA (*Rhizhopagus*, *Glomus*, *Scutellospora* y *Acaulospora*), lo que indica que ciertos nutrientes favorecen la presencia de estos hongos. Este resultado es consistente con estudios previos que indican que elementos químicos como el azufre, poco móvil en el suelo, son facilitados por las HMA para mejorar el desarrollo temprano de las plantas y la movilización de nutrientes esenciales (Toro *et al.*, 2008). Además, la correlación positiva entre estos nutrientes y géneros específicos de HMA destaca la influencia directa de la fertilización química en la estructura de las comunidades micorrízicas.

En contraste, en fincas sin aplicación de fertilizantes, nutrientes como P, K, Ca, S y Zn mostraron una correlación positiva con géneros diferentes de HMA, lo que indica que la fertilización puede alterar las dinámicas de disponibilidad de nutrientes y, por ende, la composición de las comunidades micorrízicas. Hazard *et al.* (2013) enfatizan que la distribución de HMA está más influenciada por factores abióticos que por la distancia geográfica, respaldando la importancia de los parámetros fisicoquímicos del suelo en la determinación de la estructura comunitaria de HMA.

Finalmente, la evaluación de los impactos ambientales asociados a la producción de cacao nacional evidenció que actividades como la preparación del terreno, el control de maleza y la aplicación de productos fitosanitarios generan impactos negativos significativos. Estos afectan componentes clave como la seguridad y salud ocupacional, la erosión, la calidad del suelo y del agua, así como la biodiversidad debido a la presencia de desechos. Estas prácticas, que alteran físicamente el suelo y contribuyen a la erosión y contaminación química, coinciden con los hallazgos de Hernández-Hernández *et al.* (2017), quienes documentaron una degradación significativa del suelo y de las comunidades microbianas asociada al uso intensivo de agroquímicos.

Por otro lado, el manejo de insectos benéficos y la generación de empleo representaron impactos positivos en las fincas estudiadas. Estas actividades mejoraron la calidad de vida de la población local y la infraestructura de servicios públicos, destacando los beneficios socioeconómicos derivados de prácticas agrícolas sostenibles. Esta dualidad resalta la necesidad de equilibrar las prácticas de manejo agrícola para maximizar los beneficios sociales y minimizar las repercusiones ambientales, promoviendo así la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas de cultivo de cacao.

Por lo tanto, adoptar prácticas de manejo agrícola que promuevan la diversidad y funcionalidad de los HMA es fundamental para la sostenibilidad de los sistemas de cultivo de

cacao. La disminución de HMA en fincas fertilizadas no solo compromete la salud del suelo, sino que también puede reducir la productividad y resiliencia del cultivo de cacao. Además, es recomendable investigar el impacto a largo plazo de estas prácticas y su interacción con otros factores ambientales y socioeconómicos, conforme a las recomendaciones de Kivlin *et al.* (2011), que subrayan la necesidad de una comprensión más profunda de la diversidad global de HMA y sus implicaciones ecológicas.

Conclusión

La investigación reveló que las prácticas agrícolas sin fertilización en fincas de cacao favorecen una mayor diversidad y riqueza de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), contribuyendo a la sostenibilidad del ecosistema del suelo. Además, se identificaron impactos ambientales negativos significativos, principalmente asociados con la preparación del terreno y el uso de productos fitosanitarios.

Referencias bibliográficas

- Arévalo-Hernández, C. O. (2016). Prospección de la densidad de esporas y colonización de micorrizas en cacao silvestre de Ucayali y Madre de Dios. Tesis Agronomía. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Calderón, F. E. J., Guerra, J. W. C., & Lucio, D. A. O. (2019). Impacto Ambiental Provocado Por El Inadecuado Uso De Fertilizantes Químicos En Cultivos De Maíz. Unesum - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.47230/Unesum-Ciencias.V3.N1.2019.128>
- Guanuche, R. E. R., Reinoso, M. D. R. V., Romero, D. J., & Romero, R. A. M. (2024). Análisis De Las Exportaciones Cacaoteras En Sudamérica Y Su Relación Con Ecuador. Uniandes Episteme, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.61154/Rue.V11i1.3382>
- Hassan, Seld., Boon, E., St-Arnaud, M., & Hijri, M. (2011). Molecular biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in trace metalpolluted soils. Mol Ecol. 20(16):3469-3483. Doi: <http://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2011.05142.x>
- Hazard, C., Gosling, P., Van Der Gast, C. J., Mitchell, D. T., Doohan, F. M., & Bending, G. D. (2013). The role of local environment and geographical distance in determining community composition of arbuscular mycorrhizal fungi at the landscape scale. The ISME journal, 7(3)herna, 498-508002E
- Hernández-Hernández, R. M., Roldán, A., Caravaca, F., Rodríguez-Caballero, G., Torres, M. P., Maestre, F. T., & Alguacil, M. M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungal

- assemblages in biological crusts from a Neotropical savanna are not related to the dominant perennial *Trachypogon*. *Science of the Total Environment*, 575, 1203-1210.
- Kivlin, S. N., Hawkes, C. V., & Treseder, K. K. (2011). Global diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(11), 2294-2303.
- Márquez Dávila, E. E. (2023). Micorrización Natural Y Densidad De Esporas De Hongos Micorrizicos Arbusculares En Granadilla (*Passiflora Ligularis* Juss), Huánuco. [Http://Repositorio.Unheval.Edu.Pe/Handle/20.500.13080/8438](http://Repositorio.Unheval.Edu.Pe/Handle/20.500.13080/8438)
- Millar, N., & Bennett, A (2016). Stressed out symbiotes: hypotheses for the influence of abiotic stress on arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*. 182(3):625-641. Doi: <http://doi.org/10.1007/s00442-016-3673-7>
- Molina, J. R., Cabrales, L. O., Pachajoa, L. E., Buitrago, M. R., & Suarez, Y. J. (2021). Producción De Hojarasca Y Su Aporte De Nutrientes En Cacao Bajo Diferentes Esquemas De Fertilización, Rionegro-Santander. *Agronomía Costarricense*, 193-206. [Https://Doi.Org/10.15517/Rac.V45i1.45790](https://doi.org/10.15517/Rac.V45i1.45790)
- Ortiz, J., Faggioli, V. S., Ghio, H., Boccolini, M. F., Ioele, J. P., Tamburrini, P., Garcia, F. O., & Gudelj, V. (2020). Impacto A Largo Plazo De La Fertilización Sobre La Estructura Y Funcionalidad De La Comunidad Microbiana Del Suelo. *Ciencia Del Suelo*, 38(1), 45-55.
- Pineda, J. F. S., Pérez, U. A., Rodríguez, A., & Rojas, E. T. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biológica Colombiana*, 25(3).
- Ponce, M. (2023). sector exportador. [Https://Informes.Ratingsprc.Com/Files/Notas/Ecuador/1705696094/Ec-Sectorial Exportaciones -202310.Pdf](https://Informes.Ratingsprc.Com/Files/Notas/Ecuador/1705696094/Ec-Sectorial Exportaciones -202310.Pdf)
- Prieto-Benavides, O. O., Belezaca-Pinargote, C. E., Mora-Silva, W. F., Garcés-Fiallos, F. R., Sabando-Ávila, F. A., & Cedeño-Loja, P. E. (2012). Identificación de hongos micorrizicos arbusculares en Sistemas Agroforestales con cacao en el Trópico Húmedo Ecuatoriano. *agronomía mesoamericana*, 23(2), 233-239.
- Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Henao Jaramillo, P., Gutiérrez, L. A., Molina Guzmán, L. P., Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Henao Jaramillo, P., Gutiérrez, L. A., & Molina Guzmán, L. P. (2019). Caracterización De Hongos Micorrizicos Arbusculares De Suelos Ganaderos Del Trópico Alto Y Trópico Bajo En Antioquia, Colombia. *Idesia (Arica)*, 37(1), 35-44. [Https://Doi.Org/10.4067/S0718-34292019005000301](https://doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301)
- Robdrup, M., Hubbard, M., Gorim, L. Y., & Gorzelak, M. A. (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Under Intercrop, Regenerative, And Conventional Agriculture Systems. En G. J. Ahammed & R. Hajiboland (Eds.), *Arbuscular Mycorrhizal Fungi And Higher Plants: Fundamentals And Applications* (Pp. 287-318). Springer Nature. [Https://Doi.Org/10.1007/978-981-99-8220-2_13](https://doi.org/10.1007/978-981-99-8220-2_13)
- Toro, M., Bazó, I., & López, M. (2008). Micorrizas arbusculares y bacterias promotoras de crecimiento vegetal, biofertilizantes nativos de sistemas agrícolas bajo manejo conservacionista. *Agronomía Tropical*, 58(3), 215-221.
- Varma, A. (2008). *Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology, EcoFunction, Biotechnology, Eco-Physiology, Structure and Systematics*. Noida, India. Springer.
- Vogel-Mikuš, K., Drobne, D., & Regvar, M. (2005) Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf. (*Brassicaceae*) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia. *Environ Pollut*. 133(2):233-242. Doi: <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.06.021>
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., & Reddy, S. P. P. (2023). Role Of Arbuscular Mycorrhizal Fungi In Regulating Growth,

Enhancing Productivity, And Potentially Influencing Ecosystems Under Abiotic And Biotic Stresses. *Plants*, 12(17), 3102. <https://doi.org/10.3390/Plants12173102>