

LOMBRICES COMO BIOINDICADORES DE LA SOSTENIBILIDAD EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO FINO DE AROMA (*Theobroma cacao* L): UN ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE MANEJO AGROECOLÓGICO Y CONVENCIONAL

EARTHWORMS AS BIOINDICATORS OF SUSTAINABILITY IN COCOA PRODUCTION SYSTEMS (*Theobroma cacao* L): A COMPARATIVE STUDY BETWEEN AGROECOLOGICAL AND CONVENTIONAL MANAGEMENT

Marco O. Vizuete Montero^{1a*}, Mónica I. Izurieta Castelo^{1b}, Greys C. Herrera Morales^{1c}, Hilter F. Figueroa Saavedra^{1d}

^{1a} Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, sede Orellana, vía al Sacha Km 3, Francisco de Orellana, 220201, Orellana, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-8272-419X>

^{1b} Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, sede Orellana, vía al Sacha Km 3, Francisco de Orellana, 220201, Orellana, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-7545-6411>

^{1c} Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, sede Orellana, vía al Sacha Km 3, Francisco de Orellana, 220201, Orellana, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-9184-0333>

^{1d} Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, sede Orellana, vía al Sacha Km 3, Francisco de Orellana, 220201, Orellana, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-1717-319X>

* Autor para correspondencia: marco.vizuete@epoch.edu.ec

RESUMEN

Las lombrices de tierra son ampliamente reconocidas como organismos sensibles a cambios en el manejo del suelo; sin embargo, existe un vacío en la comprensión de su respuesta en sistemas de cacao fino de aroma, bajo diferentes esquemas de manejo en contextos tropicales. El objetivo de este estudio fue comparar la densidad, biomasa y diversidad de lombrices de tierra, así como propiedades fisicoquímicas del suelo, entre sistemas agroecológicos y convencionales de producción de cacao (*Theobroma cacao* L). Se realizó un estudio observacional longitudinal con muestreos en dos épocas climáticas durante el año 2024. Las lombrices fueron recolectadas mediante el método TSBF y clasificadas en grupos ecológicos, mientras que la diversidad se estimó mediante el índice de Shannon-Wiener basado en morfotipos. El análisis estadístico incluyó pruebas de normalidad, modelos lineales mixtos y pruebas de t Student ($\alpha=0,05$). Los resultados mostraron incrementos significativos en densidad (hasta +249%) y biomasa (hasta +236%) en sistemas agroecológicos ($p<0,001$), así como mayor diversidad ($H' = 2,15$ ante 1,02). Además, estos sistemas presentaron mayores contenidos de materia orgánica (+73,9%), humedad y menor acidez en el suelo. Se concluye que las lombrices responden de manera consistente al manejo agroecológico, evidenciando su potencial como indicador biológico de condiciones biológicas de condiciones edáficas, aunque se requieren estudios adicionales para establecer relaciones causales y su rol como indicadores de sostenibilidad.

Palabras clave: agroecología tropical, bioindicadores edáficos, macrofauna del suelo, sostenibilidad agrícola, *Theobroma cacao* L.

ABSTRACT

Earthworms are widely recognized as organisms that are sensitive to changes in soil management; however, there is a gap in our understanding of their response in fine-aroma cocoa systems under different management regimes in tropical contexts. The objective of this study was to compare earthworm density, biomass, and diversity, as well as soil physicochemical properties, between agroecological and conventional cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. A longitudinal observational study was conducted with sampling during two climatic seasons in 2024. Earthworms were collected using the TSBF method and classified into ecological groups, while diversity was estimated using the Shannon-Wiener index based on morphotypes. Statistical analysis included normality tests, mixed linear models, and Student's t-tests ($\alpha=0.05$). The results showed significant increases in density (up to +249%) and biomass (up to +236%) in agroecological systems ($p<0.001$), as well as greater diversity ($H'=2.15$ vs. 1.02). In addition, these systems exhibited higher organic matter content (+73.9%), moisture, and lower soil acidity. It is concluded that earthworms consistently respond to agroecological management, demonstrating their potential as a biological indicator of edaphic conditions, although further studies are needed to establish causal relationships and their role as indicators of sustainability.

Keywords: tropical agroecology, soil bioindicators, soil macrofauna, agricultural sustainability, *Theobroma cacao* L.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) constituyen un importante componente económico y ecológico en regiones tropicales, donde estas prácticas agrícolas inciden directamente en los procesos biogeoquímicos del suelo y la biodiversidad asociada (Fan et al., 2025; Qin y Zhang, 2025). En las últimas décadas, la producción de cacao se incrementó considerablemente, generando una dicotomía entre los sistemas convencionales, en los cuales el uso intensivo de productos químicos constituye la principal estrategia productiva, frente al sistema agroecológico, donde se aplican principios ecológicos y sociales que favorecen a la conservación de los servicios ecosistémicos (Vizuete et al., 2024; Zhong et al., 2025). Esta dualidad ha generado interés en desarrollar metodologías que permitan evaluar la sostenibilidad y resiliencia de este tipo de agroecosistemas, particularmente en sistemas de cacao fino de aroma, un cultivo de alto valor que combina relevancia económica con potencial para prácticas sostenibles Cavalcanti et al., 2025; Domínguez et al., 2024).

El cacao fino de aroma representa un sistema singular para esta investigación debido a su alta susceptibilidad a las condiciones de suelo y su frecuente asociación con sistemas agroforestales, los cuales modulan significativamente las comunidades biológicas edáficas (Carmona et al., 2020; Santa et al., 2024). Para evaluar la sostenibilidad de agroecosistemas, se requieren indicadores sensibles a las prácticas de manejo que reflejen la productividad y la sanidad vegetal

del ecosistema (Carmona et al. 2020; Vizuete et al., 2025). Desde el punto de vista, las comunidades de macroinvertebrados edáficos, como las lombrices de tierra (Annelida: Oligochaeta), han sido consideradas como bioindicadores de calidad de suelo, debido a su sensibilidad a las perturbaciones antropogénicas (Martínez et al., 2020).

Las lombrices de tierra son consideradas "ingenieros del ecosistema" debido a su capacidad para modificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Lavergne et al., 2025; Jacquin et al., 2025). Su actividad de bioturbación contribuye a la formación de agregados estables, mejorando la porosidad del suelo, lo cual favorece a la infiltración de agua, mientras que su metabolismo facilita la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes (Maharjan et al., 2018). Estas funciones ecológicas son particularmente relevantes en Sistemas Agroforestales (SAF) como el cacao, donde la cobertura arbórea aporta continuamente hojarasca, generando condiciones favorables para el establecimiento de comunidades de oligoquetos (Wu et al., 2025; Vizuete et al., 2024).

A pesar del reconocimiento de las macroinvertebrados edáficos como bioindicadores, actualmente existe una comprensión aún limitada sobre su dinámica ecológica en sistemas de producción de cacao fino de aroma (*T. cacao* L.) en la región norte de la Amazonía ecuatoriana (Montero et al., 2024; Intriago et al., 2024). En la literatura, existe un déficit de estudios comparativos longitudinales que integren indicadores biológicos, físicos y químicos del suelo bajo distintos manejos

agronómicos. Esta brecha limita la capacidad de evaluar de manera integral la sostenibilidad edáfica, lo que dificulta el diseño de estrategias productivas resilientes, especialmente en zonas tropicales, donde la biodiversidad edáfica cumple un rol clave en la salud y equilibrio ecosistémico.

En este contexto, el aporte novedoso del presente estudio radica en la integración longitudinal de múltiples indicadores biológicos (densidad, biomasa, diversidad de lombrices) y físicoquímicos del suelo, con el fin de elucidar los mecanismos subyacentes a las diferencias entre sistemas de manejo en un cultivo de alto valor como el cacao fino de aroma.

Por lo tanto, evaluar el impacto de los manejos agroecológicos y convencionales sobre la población de la macrofauna (particularmente lombrices de tierra) en cultivos perennes como el cacao es crucial para identificar las prácticas que promueven la sostenibilidad agrícola. Este conocimiento resulta clave para orientar la toma de decisiones tanto a nivel de productores como de formuladores de políticas públicas, favoreciendo la adopción de estrategias que mejoren la calidad del suelo y, por consiguiente, contribuyan a la productividad y conservación ambiental.

Para este estudio, se planteó la siguiente hipótesis: los sistemas de producción de cacao bajo manejo agroecológico presentan una mayor abundancia, diversidad y biomasa de lombrices de tierra en comparación con los sistemas convencionales; estas diferencias están asociadas a mejorar en las propiedades físicoquímicas de suelo (mayor contenido de materia orgánica, pH más cercano a la neutralidad y mayor humedad); así como a una menor intensidad de perturbaciones. Sobre esta base, el objetivo de esta investigación fue comparar la abundancia, biomasa y diversidad de lombrices de tierra en sistemas de producción de cacao fino de aroma bajo el manejo agroecológico y convencional, y analizar su relación con las propiedades físicoquímicas del suelo para evaluar su potencial como bioindicadores de sostenibilidad edáfica.

Finalmente, se considera que el aporte de este estudio es contribuir al desarrollo y validación de protocolos integrales de evaluación de sostenibilidad en sistemas cacaoteros, proporcionando evidencia empírica sobre cómo el manejo agroecológico influye en la funcionalidad biológica del suelo a través de las comunidades de lombrices y los mecanismos edáficos asociados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y lugar de estudio

El estudio se desarrolló en fincas cacaoteras ubicadas en las provincias de Sucumbios

(cantón Shushufindi; coordenadas 0°3'49.12" N y 76°53'55.32" O), Orellana (cantón Joya de los Sachas, 0°18'2.91" S; 76°50'37.64" O) y Pastaza (cantón Santa Clara 1°16'21.50" S; 77°53'13.59" O). Estas zonas seleccionadas presentan condiciones edafoclimáticas representativas de los ecosistemas tropicales amazónicos, con una temperatura anual que oscila entre 24 y 26°C, precipitaciones anuales de 3000–4000 mm y una humedad relativa del 85%.

Se desarrolló bajo el contexto investigativo de tipo observacional, longitudinal y analítico con medidas repetidas en el tiempo. Se seleccionó un diseño observacional (no experimental) debido a que las prácticas de manejo (agroecológico y convencional) ya estaban establecidas por los agricultores, y no fue posible asignarlas aleatoriamente. En consecuencia, el estudio permite identificar asociaciones robustas, aunque no inferir relaciones causales directas. Para controlar las diferencias ecológicas inherentes entre fincas, se aplicó un muestreo no probabilístico, basado en criterios de similitud de condiciones edafoclimáticas (textura del suelo, clima tropical húmedo) y prácticas culturales consistentes dentro de cada sistema de manejo (Kumar y Kumar, 2025).

Todas las fincas seleccionadas tenían más de ocho años de aplicación continua del sistema productivo, lo que permitió asumir un estado relativamente estable del suelo. Este procedimiento permitió evaluar comparativamente la abundancia, biomasa y diversidad de lombrices de tierra como bioindicadores de sostenibilidad edáfica en fincas dedicadas al cultivo de cacao fino de aroma (*T. cacao* L.), bajo dos tipos de manejo agrónómico, el convencional y el agroecológico con sistemas agroforestales. El enfoque longitudinal permitió captar variaciones temporales a lo largo del ciclo productivo del cacao.

Selección de fincas y unidad experimental

Se seleccionaron 18 fincas: 9 con manejo agrícola agroecológico y 9 con manejo convencional. La unidad experimental fue una parcela de 50 x 50 m (2500 m²) establecida en cada finca, la cual representó la réplica independiente para los análisis estadísticos (n=9 por sistema de manejo). El número de réplicas (n=9 por tratamiento) se consideró adecuado para detectar diferencias significativas, respaldado por estudios previos en agroecosistemas tropicales y un análisis preliminar de poder estadístico. En cada parcela, se establecieron sistemáticamente cinco puntos de muestreo dispuestos en forma de cruz (cuatro esquinas y un punto central), con el fin de reducir la variabilidad espacial intraparcelas.

Muestreo de lombrices y suelo

Se recolectaron lombrices mediante el método TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility). En cada punto de muestreo, se extrajo un monolito de suelo de 25 x 25 x 30 cm. Para la extracción de las lombrices epigeas se revisó la hojarasca y los primeros 2–3 cm del suelo, mientras que para las lombrices anécicas se examinó el suelo desde los 10 hasta los 30 cm de profundidad (Huera-Lucero et al., 2025). Las lombrices endogeas fueron consideradas dentro del volumen total del monolito (0-30 cm), sin embargo, su baja abundancia relativa y dificultad de identificación morfológica en campo limitaron su diferenciación taxonómica fiable, por lo que no se analizaron como grupo independiente. Adicionalmente, se aplicó una solución de mostaza al 0,5% como irritante para facilitar la extracción. El muestreo se realizó en dos épocas climáticas: temporada lluviosa (abril – mayo) y temporada menos lluviosa (agosto- septiembre) del año 2024, permitiendo incorporar la variabilidad estacional en el análisis.

Las lombrices recolectadas fueron lavadas, contadas y pesadas para obtener la biomasa fresca (g m^{-2}). Adicionalmente, fueron clasificadas inicialmente en grupos ecológicos funcionales (epigeas y anécicas). Dentro de cada grupo se distinguieron varios morfotipos, definidos a partir de sus rasgos morfológicos externos tales como tamaño, coloración, segmentación y forma del clitelo, los cuales contribuyeron la unidad utilizada para el cálculo del índice de Shannon-Wiener. Por tanto, la diversidad estimada refleja la heterogeneidad de morfotipos dentro de la comunidad y no únicamente la proporción entre grupos ecológicos.

Paralelamente, en cada parcela se tomaron muestras de suelo para determinar pH, textura, contenido de materia orgánica y humedad

gravimétrica, siguiendo metodologías estándar (pH en suspensión suelo: agua 1:2,5; materia orgánica por método Walkley-Black; humedad por gravimetría).

Análisis estadístico

Se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Dado que se tomaron mediciones en las mismas parcelas en dos épocas, se implementó un modelo lineal mixto, para considerar la estructura de medias repetidas, definiendo el sistema de manejo como fijo y la finca como un efecto aleatorio, e incorporando la época como factor de repetición temporal (Vizuete et al., 2024).

Para las comparaciones entre los dos niveles del sistema de manejo (agroecológico ante convencional), se utilizó la prueba t de Student para muestras independientes, adecuadas para diseños como un solo factor y dos niveles. En los casos donde no se cumplieron los supuestos de normalidad o homogeneidad de varianzas, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney.

Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el software RStudio 4.4.2 utilizando paquetes especializados para modelos mixtos.

RESULTADOS

Los resultados presentados en la Tabla 1 revelan diferencias notables en las densidades de lombrices entre ambos sistemas productivos. Dado que el factor sistema de manejo presenta únicamente dos niveles (agroecológico y convencional), el contraste estadístico se realizó mediante la prueba de t Student para muestras independientes, la cual es matemáticamente

Tabla 1. Densidad de lombrices de tierra (ind m^{-2}) en sistemas de cacao fino de aroma bajo manejo agroecológico y convencional.

Table 1. Earthworm density (ind m^{-2}) in fine-aroma cocoa systems under agroecological and conventional management.

Sistema de manejo	Grupo ecológico	n	Densidad (ind m^{-2})	Incremento (%)	Estadístico t	Valor de p
Agroecológico	Epigeas	9	84,44 ± 7,63	236	t=21,49	<0,001
Convencional	Epigeas	9	25,11 ± 3,22			-
Agroecológico	Anécicas	9	15,11 ± 2,85	249	t=10,71	<0,001
Convencional	Anécicas	9	4,33 ± 1,00			-

Valores expresados como media ± error estándar.

Comparaciones realizadas mediante pruebas t de Student para muestras independientes ($\alpha=0,05$).

Para un diseño con un solo factor y dos niveles, el ANOVA de una vía es equivalente a la prueba ($F= t^2$), por lo que se reporta el estadístico t para mayor claridad interpretativa.

equivalente al ANOVA de una vía en este tipo de diseño ($F=t^2$). Las lombrices epigeas muestran una densidad media de $84,44 \pm 7,63$ ind m^{-2} en sistemas agroecológicos, frente a $25,11$ ind m^{-2} en sistemas convencionales ($p<0,001$). Estas diferencias representan un incremento del 236% en favor de ellos sistemas agroecológicos.

Por otro lado, las lombrices anécicas presentan un patrón similar, aunque con densidades inferiores. La media de $15,11 \pm 2,85$ ind m^{-2} en sistemas agroecológicos frente a $4,33 \pm 1,00$ ind m^{-2} en convencionales ($p<0,001$) representa un incremento del 249 %. La aplicación de la prueba t permitió una interpretación directa de las diferencias entre medias, manteniendo la robustez del análisis estadístico.

La Tabla 2 evidencia que la biomasa de lombrices de tierra presenta diferencias altamente significativas ($p<0,001$) entre sistemas de manejo, confirmando un efecto consistente del manejo agroecológico sobre la estructura funcional de la macrofauna edáfica. En el caso de las lombrices epigeas, la biomasa en sistemas agroecológicos ($17,91$ g m^{-2}) es significativamente superior a la observada en sistemas convencionales ($5,89$ g m^{-2}), lo que representa un incremento del 204 %. El valor elevado del estadístico t ($t= 17,64$) lo cual indica una separación clara entre las medias,

con baja superposición de las distribuciones, lo cual sugiere alta consistencia intra - sistema y un efecto de gran magnitud.

Por otro lado, las lombrices anécicas, la diferencia es aún más marcada en términos absolutos, con valores de $39,52$ g m^{-2} en sistemas agroecológicos frente a $11,77$ g m^{-2} en convencionales (+236). El estadístico $t=13,02$ confirma una diferencia robusta, indicando que el manejo agroecológico favorece no solo a la abundancia, sino también al desarrollo de individuos (lombrices) con mayor biomasa, lo cual es indicativo de mejores condiciones tróficas y estructura del suelo.

Desde este enfoque ecológico funcional, estos resultados sugieren que la biomasa constituye un indicador más integrador que la intensidad, ya que refleja simultáneamente la abundancia, el tamaño corporal y el estado fisiológico de las poblaciones. En este contexto, los sistemas agroecológicos no solo incrementan el número de individuos (lombrices) sino que promueven comunidades más desarrolladas y potencialmente más activas en procesos clave como la bioturbación, agregación del suelo y ciclado de nutrientes.

Los resultados de la Tabla 3 muestran que el índice de diversidad de Shannon – Wiener

Tabla 2. Biomasa de lombrices de tierra (g m^{-2}) en sistemas de cacao fino de aroma bajo manejo agroecológico y convencional.

Table 2. Earthworm biomass (g m^{-2}) in fine-aroma cocoa systems under agroecological and conventional management.

Sistema de manejo	Grupo ecológico	n	Biomasa (g m^{-2})	Incremento (%)	Estadístico t	Valor de p
Agroecológico	Epigeas	9	$17,91 \pm 1,74$	204	$t= 17,64$	$<0,001$
Convencional	Epigeas	9	$5,89 \pm 0,66$			
Agroecológico	Anécicas	9	$39,52 \pm 3,81$	236	$t= 13,02$	$<0,001$
Convencional	Anécicas	9	$11,77 \pm 1,69$			

Valores expresados como media \pm error estándar.

Comparaciones realizadas mediante pruebas t de Student para muestras dependientes ($\alpha=0,05$).

Tabla 3. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') de lombrices de tierra en sistemas de cacao fino de aroma bajo manejo agroecológico y convencional.

Table 3. Shannon-Wiener diversity index (H') of earthworms in fine-aroma cocoa systems under agroecological and conventional management.

Sistema de manejo	n	Índice H'	Estadístico t	Valor de p
Agroecológico	9	$2,15 \pm 0,18$	$t=5,41$	$<0,001$
Convencional	9	$1,02 \pm 0,12$		

Valores expresados como media \pm error estándar.

Comparación realizada mediante prueba t de Student para muestras independientes ($\alpha=0,05$)

(H') es significativamente mayor en sistemas agroecológicos ($2,15 \pm 0,18$) en comparación con los sistemas convencionales ($1,02 \pm 0,12$), con diferencias estadísticamente significativas ($t=5,41$; $p<0,001$). Este resultado indica una mayor heterogeneidad en la distribución de los morfotipos de lombrices en sistemas agroecológicos, lo cual sugiere una comunidad edáfica más equilibrada en términos relativos.

La Tabla 4 evidencia diferencias estadísticamente significativas ($p<0,001$) en todas las propiedades fisicoquímicas evaluada, lo que indica un efecto consistente del sistema de manejo sobre la calidad del suelo. El pH del suelo mostró valores significativamente mayores en sistemas agroecológicos (5,34) respecto a los convencionales (4,72), lo que sugiere una menor acidez relativa, condición que puede favorecer la disponibilidad de nutrientes.

Por otro lado, el contenido de materia orgánica presentó la mayor diferencia relativa (+73,9%) evidenciando un enriquecimiento sustancial del suelo bajo manejo agroecológico. Este resultado es consistente con prácticas como la incorporación de residuos orgánicos y menor disturbio del suelo.

En cuanto a la humedad, los sistemas agroecológicos registraron valores superiores (29,68% ante 23,12), lo cual indica una mayor capacidad de retención hídrica, probablemente asociada al incremento de materia orgánica y mejor estructura del suelo. En conjunto, los resultados encontrados demuestran diferencias significativas en propiedades edáficas entre sistemas de manejo.

La Tabla 5 muestra diferencias altamente significativas ($p<0,001$) en la densidad de lombrices entre sistemas de manejo para ambos grupos ecológico. En las lombrices epigeas, el valor $t=21,49$ indica una diferencia muy marcada entre sistemas, reflejando un efecto fuerte del manejo agroecológico sobre la abundancia superficial. Las lombrices anécicas, el valor $t=10,71$ también evidencia diferencias significativas, aunque con menor magnitud relativa, lo cual es consistente con su comportamiento ecológico más profundo en el perfil del suelo.

La Tabla 6 presenta diferencias altamente significativas ($p<0,001$) en la biomasa de lombrices entre sistemas de manejo para ambos grupos ecológicos. En lombrices epigeas, el valor $t=17,64$

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del suelo en sistemas de cacao fino de aroma bajo manejo agroecológico y convencional.

Table 4. Physicochemical properties of soil in fine-aroma cocoa systems under agroecological and conventional management.

Parámetro del suelo	Sistema de Manejo	n	Valor	Incremento		
				(%)	Estadístico t	Valor de p
pH	Agroecológico	9	$5,34 \pm 0,17$	+13,1	$t= 3,89$	<0,001
	Convencional	9	$4,72 \pm 0,14$			
Materia orgánica (%)	Agroecológico	9	$4,00 \pm 0,29$	+73,9	$t=4,68$	<0,001
	Convencional	9	$2,30 \pm 0,27$			
Humedad (%)	Agroecológico	9	$29,68 \pm 1,33$	+28,4%	$t= 4,27$	<0,001
	Convencional	9	$23,12 \pm 0,82$			

Valores expresados como media \pm error estándar.

Comparación realizada mediante prueba t de Student para muestras independientes ($\alpha=0,05$).

Tabla 5. Comparación estadística de la densidad de las lombrices de tierra (ind m⁻²) entre sistemas de manejo.

Table 5. Statistical comparison of earthworm density (ind m⁻²) across management systems.

Variable	Grupo ecológico	n Agroecológico / convencional	Media \pm EE		Estadístico t	Valor de p
			Agroecológico	Convencional		
Densidad	Epigeas	9/9	$84,44 \pm 7,63$	$25,11 \pm 3,22$	$t=21,49$	<0,001
Densidad	Anécicas	9/9	$15,11 \pm 2,85$	$4,33 \pm 1,00$	$t=10,71$	<0,001

Valores expresados como media \pm error estándar (EE).

Comparaciones realizadas mediante prueba t de Student para muestras independientes ($\alpha=0,05$).

Tabla 6. Comparación estadística de la biomasa de lombrices en tierra (ind m⁻²) entre sistemas de manejo.**Table 6. Statistical comparison of earthworm biomass (ind m⁻²) across management systems.**

Variable	Grupo ecológico	n Agroecológico / convencional	Media ± EE		Estadístico t	Valor de p
			Agroecológico	Convencional		
Densidad	Epigeas	9/9	17,91±1,74	5,89±0,66	t=17,64	<0,001
Densidad	Anécicas	9/9	39,52±3,81	11,77±1,69	t=13,02	<0,001

Valores expresados como media ± error estándar (EE).

Comparaciones realizadas mediante prueba t de Student para muestras independientes ($\alpha=0,05$).

refleja una diferencia marcada entre sistemas, indicando un incremento sustancial de biomasa en condiciones agroecológicas. Por otro lado, las lombrices anécicas, el valor $t=13,02$, confirma una diferencia significativa, con una mayor biomasa absoluta en este grupo, lo cual es consistente con un mayor tamaño corporal y actividad en horizontes profundos.

La Tabla 7 muestra diferencias estadísticamente significativas ($p<0,001$) en todas las propiedades fisicoquímicas evaluadas entre sistemas de manejo. El pH presentó un valor $t=3,89$ indicando una diferencia significativa hacia condiciones menos ácidas en sistemas de manejo agroecológico. Por otro lado, la materia orgánica evidenció el mayor contraste relativo ($t=4,27$), indicando una mayor capacidad de retención hídrica en condiciones agroecológicas. También se aprecia la humedad en el suelo, este mostró diferencias relevantes ($t=4,27$), indicando una mayor capacidad de retención hídrica en condiciones agroecológicas que en sistemas de cultivo convencional.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian diferencias consistentes y estadísticamente significativa entre los sistemas de manejo, lo cual tienen implicaciones relevantes para la comprensión de la dinámica de la macrofauna edáfica en sistemas de producción de cacao. Las lombrices de tierra, como ingenieros ecosistémicos, desempeñan roles críticos en la formación de estructuras del suelo, el ciclado de nutrientes y la regulación hídrica. En este estudio, se observó un incremento significativo en la densidad y biomasa en sistemas agroecológicos, lo cual es consistente con estudios previos realizados por Aldini et al. (2025) y Chen et al. (2024), donde se documentaron mayores abundancias de lombrices en sistemas bajo manejo orgánico. Asimismo, Martínez et al. (2025), reportaron que prácticas agroecológicas

favorecen particularmente a las lombrices anécicas, lo cual coincide con los patrones observados en este estudio.

En cuanto a la biomasa, los resultados son consistentes con investigaciones previas de Fusaro et al. (2018), quienes documentaron que la biomasa de las lombrices constituye un indicador más sensible del estado funcional del suelo que la simple abundancia numérica. Los resultados de este estudio confirman esta tendencia, evidenciando incrementos porcentuales mayores en biomasa que en la densidad, lo que sugiere que el manejo agroecológico no solo incrementa el número de individuos, sino también su desarrollo corporal. En concordancia, Lavergne et al. (2025) señalan que la biomasa integra aspectos fisiológicos y metabólicos, lo que la convierte en un indicador más robusto de la actividad biológica del suelo.

El índice de Shannon-Wiener significativamente mayor en los sistemas agroecológicos indican una mayor heterogeneidad en la distribución de los morfotipos de lombrices, lo cual sugiere una comunidad edáfica más equilibrada en términos relativos. Sin embargo, es importante precisar que la diversidad fue estimada a partir de morfotipos y no a nivel de especie, lo que constituye una limitación del estudio, ya que no permite inferir requerimientos ecológicos específicos ni relaciones funcionales detalladas entre especies. En este sentido, aunque el uso de morfotipos es metodológicamente válido en estudios de campo con limitaciones taxonómicas, reduce la precisión en la evaluación del papel de las lombrices como bioindicadores específicos.

Respecto a las propiedades del suelo, los resultados son consistentes con los hallazgos de Liu et al. (2025) y Vizueté et al. (2025), quienes establecieron que los sistemas de cultivos agroecológicos tienden a mantener un pH más cercanos a la neutralidad, asociados a una mayor capacidad tampón derivada de la materia orgánica. De manera similar, Maharjan

Tabla 7. Comparación estadística de las propiedades fisicoquímicas del suelo entre sistemas de manejo.**Table 7. Statistical comparison of soil physicochemical properties across management systems.**

Variable	n Agroecológico / convencional	Media ± EE		Estadístico t	Valor de p
		Agroecológico	Convencional		
pH	9/9	5,34 ±0,17	4,72 ±0,14	t=3,89	<0,001
Materia orgánica (%)	9/9	4,00 ± 0,29	2,30 ±0,27	t=4,68	<0,001
Humedad del suelo (%)	9/9	29,68 ±1,33	23,12±0,82	t=4,27	<0,001

Valores expresados como media ±error estándar (EE).

et al. (2018), documentaron que las prácticas agroecológicas favorecen la estabilidad del pH del suelo a través de procesos biogeoquímicos complejos.

El contenido de materia orgánica presentó las mayores diferencias relativas, lo cual coincide con lo reportado por Samarawickrama et al. (2025), quienes evidenciaron incrementos significativos en el carbono orgánico en sistemas agroecológicos. Asimismo, Kafy et al. (2022) reportaron incrementos del 30–50%, mientras que en el presente estudio se observaron incrementos superiores, lo que refuerza el efecto positivo del manejo agroecológico sobre la acumulación del carbono en el suelo.

Encuanto a la humedad del suelo, los valores más altos en sistemas agroecológicos son consistentes con una mayor capacidad de retención hídrica, posiblemente asociada al incremento de materia orgánica y a mejoras en la estructura del suelo. No obstante, es importante destacar que, aunque estos parámetros fisicoquímicos fueron medidos, no se realizó un estadístico inferencial que evalúe directamente su relación con las variables biológicas, por lo que las asociaciones observadas deben interpretarse con cautela.

En relación con el uso de lombrices como bioindicadores, es necesario matizar su interpretación en el contexto de este trabajo investigativo. Si bien se observaron respuestas consistentes en densidad, biomasa y biodiversidad frente a los sistemas de manejo, la sostenibilidad edáfica, no fue medida de manera directa mediante indicadores integrales, como, por ejemplo, funciones ecosistémicas, productividad o estabilidad a largo plazo. Por tanto, las lombrices deben ser consideradas en este trabajo como indicadores sensibles a cambios en condiciones del suelo asociado al manejo, más que como bioindicadores directos de sostenibilidad en sentido amplio.

Asimismo, se observaron mayores valores de

materia orgánica, pH y humedad en sistemas agroecológicos, no se puede establecer de manera concluyente que las diferencias en las comunidades de lombrices se deban exclusivamente a mejoras en las condiciones de hábitats o disponibilidad de recursos, ya que estas variables no fueron analizadas mediante modelos explicativos. En consecuencia, las relaciones planteadas deben interpretarse como asociaciones plausibles, pero no como mecanismos causales demostrados.

Los mecanismos potenciales que podría explicar las diferencias observadas incluyen la reducción del uso de pesticidas sintéticos en sistemas agroecológicos, lo cual ha sido documentado como un factor que disminuye la mortalidad de lombrices (Prisa y Jamal, 2025; Masebo et al., 2025), así como la incorporación de materia orgánica, que mejora las condiciones físicas y químicas del suelo. Sin embargo, estos mecanismos no fueron evaluados directamente en este estudio, por lo que su inclusión se plantea como una interpretación basada en literatura previa y no como evidencia empírica derivada de los datos analizados.

Finalmente, los resultados son consistentes con estudios como Bermeo et al. (2025), quienes reportaron una mayor diversidad de macroinvertebrados en sistemas agroecológicos. En conjunto, los hallazgos sugieren que las lombrices de tierra responden de manera sensible a los cambios en el manejo del suelo, particularmente en términos de abundancia y biomasa, lo que respalda su utilidad como indicadores biológicos de perturbación o manejo edáfico, dentro de las limitaciones metodológicas señaladas.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación demuestran que el sistema de manejo agroecológico ejerce un efecto positivo sobre

la estructura de las comunidades de lombrices de la tierra en sistemas de cacao fino de aroma. Se evidenciaron incrementos estadísticamente significativos en la densidad y biomasa de lombrices, tanto epigeas como anécicas, en comparación con sistemas convencionales, lo que indica una respuesta consistente de estos organismos frente a las prácticas de manejo.

Asimismo, el índice de diversidad de Shannon-Wiener fue significativamente mayor en sistemas agroecológicos, lo que refleja una mayor heterogeneidad en la distribución de morfotipos. No obstante, esta estimación se basó en morfotipos y no en identificación taxonómica a nivel de especie, lo que limita la interpretación funcional y ecológica de la diversidad observada.

En términos edáficos, los sistemas agroecológicos presentaron valores significativamente superiores de materia orgánica y humedad del suelo, así como un pH menos ácido, lo cual indica diferencias claras en la calidad del suelo entre sistemas de manejo. Sin embargo, dado el carácter observacional del estudio y la ausencia de análisis inferenciales que vinculen directamente variables biológicas y fisicoquímicas, no es posible establecer relaciones causales entre estas variables.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren que las lombrices de tierra responden de manera sensible a los cambios en el manejo agrícola, particularmente en términos de abundancia y biomasa, lo que respalda su utilidad como indicadores biológicos de condiciones edáficas. No obstante, su uso como bioindicadores de sostenibilidad deben interpretarse con cautela, ya que este atributo no fue evaluado directamente en el presente estudio.

En conjunto, esta investigación aporta evidencia empírica sobre las diferencias entre sistemas de manejo en agroecosistemas de cacao, destacando el potencial de los enfoques agroecológicos para favorecer comunidades edáficas más abundantes y estructuralmente diferenciadas, dentro de las limitaciones metodológicas señaladas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos con que se basan las conclusiones de este estudio pueden solicitarse al autor correspondiente.

Declaración de uso de tecnologías de IA

Durante la preparación de este manuscrito se utilizaron tecnologías de IA, en concreto Claude, para perfeccionar el lenguaje, generar ideas para

los resúmenes y crear esquemas de contenidos estructurados.

Contribución de autores

Marco Vizuete-Montero concibió la idea del estudio, diseñó la metodología, lideró el análisis de datos y redactó el manuscrito. Mónica Izurieta-Castelo participó en la revisión bibliográfica, el diseño experimental y la edición crítica del contenido. Greys Herrera-Morales colaboró en el trabajo de campo, recolección de datos y sistematización de la información. Hilter Figueroa-Saavedra contribuyó con el análisis estadístico, interpretación de resultados y revisión final del manuscrito. Todos los autores aprobaron la versión final del documento y se responsabilizan por su contenido.

LITERATURA CITADA

- Aldini, I. S., A. D. Putra, A. Q. Pradani, N. Ardiansyah, R. Sari, P. Burgers and K. Hairiah. 2025. Agroforestry for reclamation of Imperata grassland: Earthworm as indicator for soil health. *The Electrochemical Society* 1:1-12. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1466/1/012003>
- Altieri, M. A. and C. Nicholls. 2005. *Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture*. Primera edición. <https://www.agroeco.org/doc/agroecology-engl-PNUMA.pdf>
- Bádonyi, K., G. Hegyi and B. Szabolcs. 2008. Comparative agroecological study of tillage methods. *Journal of Landscape Ecology* 6(1-2): 145-163. <https://www-scopus-com.proxy.esPOCH.edu.ec/pages/publications/54049136045>
- Bermeo, O. X. B., W. J. D. Vargas y V. I. G. Arias. 2025. Aplicación de SIG en análisis de NDVI para cultivos de cacao con precisión geográfica. *Revista Alfa* 9(26):331-349. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.350>
- Carmona, J., S. Greco, R. Tapia and M. Martinelli. 2020. Use of indicators as a tool to measure sustainability in agroecosystems of arid land, San Juan, Argentina = Uso de indicadores como herramienta para medir la sustentabilidad en agroecosistemas de tierras áridas, San Juan, Argentina. *SIDAL*. <http://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCa/article/view/3508>
- Cavalcanti, A., T. A. Feitosa, T. Nascimento, B. L. Moreira, E. Moreira, M. A. Diniz, Z. Gomes and L. Nicássio. 2025. Soil fertility, physiological traits, and fruit quality of Morinda citrifolia as influenced by agroecological management

- practices in a tropical Ferralsol. *Agricultural Research* 14:200-211. <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00752-4>
- Chen, J., J. Zhao, H. Du, M. Xu, Y. Lei, W. Chen, L. Xu and J. Chao. 2024. Earthworms' role in the management and regulation of croplands: Comparative research on field and laboratory studies revealed by bibliometric analysis. *Ecological Indicators* 163:112077. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112077>
- Fan, Y., D. Gao, L. Zhang, Y. Wang, Z. Yan, L. Guo, T. Huang and Y. Qiao. 2025. Enhancing soil quality and nematode diversity through sustainable tillage and organic fertilization in the Loess Plateau's semi-arid farmlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 383:109542. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109542>
- Fusaro, S., F. Gavinelli, F. Lazzarini and M. Paoletti. 2018. Soil biological quality index based on earthworms (QBS-e): A new way to use earthworms as bioindicators in agroecosystems. *Ecological Indicators* 93:1276-1292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.007>
- Intriago, D. A. M., V. F. M. Rosado y B. R. A. Arteaga. 2024. Influencia del humus de lombriz en la calidad de los suelos agrícolas: Un estudio de caso. *Didáctica y Educación* 15(3):388-404. <http://revistas.ult.edu.cu/index.php/didascalía/gateway/plugin/publdResolver/ark:/54724/DE.v15i3.2101>
- Jacquín, E., M. Vermeire, E. Blanchart, C. Detaille, F. Régis and J. Ean. 2025. Does fertilizer type drive soil and litter macroinvertebrate communities in a sugarcane agroecosystem? Evidence from a 10-year field trial. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 381:109431. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109431>
- Kafy, A.-A., A.-A. Faisal, A. Al Rakib, M. A. Fattah, Z. A. Rahaman and G. S. Sattar. 2022. Impact of vegetation cover loss on surface temperature and carbon emission in a fastest-growing city, Cumilla, Bangladesh. *Building and Environment* 208:108573. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108573>
- Kumar, M. and M. Kumar. 2025. Determinants of soil health and its role in environmental sustainability. *CABI* 14:238-250. <https://doi.org/10.1079/9781800624597.0014>
- Lavergne, S., C. Halde and D. H. Lynch. 2025. Earthworm abundance and diversity in response to intensive crop management in organic field crop farms of southern Quebec, Canada. *Applied Soil Ecology* 206:105850. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105850>
- Liu, C., Q. Luo, Y. Xiao, H. Li, H. Dong and C. Duan. 2025. Influence of land-use type on earthworm diversity and distribution in Yunnan: Insights from soil properties. *Applied Soil Ecology* 205:105791. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105791>
- Maharjan, M., M. Sanaullah and B. Emmett. 2018. Functional biodiversity, environmental sustainability and crop nutritional properties: A case study of horticultural crops in north-eastern Italy. *Applied Soil Ecology* 123:699-708. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.023>
- Martínez, F. B., F. Guevara, C. E. Aguilar, L. A. Rodríguez, M. B. Reyes y M. La O. 2020. Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Frailesca, Chiapas. *Terra Latinoamericana* 38(4):871-881. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.793>
- Martínez-García, V., J. M. Martínez-Paz and F. Alcon. 2025. Sustainability assessment of agricultural practices integrating both LCA and ecosystem services approaches. *Ecosystem Services* 72:101698. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101698>
- Masebo, N., E. Birhane, S. Takele and J. Lucena. 2025. Microbial biomass carbon distribution under agroforestry practices and soil depth variations in Southern Ethiopia. *Agroforestry Systems* 99. <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01133-8>
- Montero, M. O. V., A. A. Ariza, N. M. Barreno, H. F. Figueroa-Saavedra, A. F. Porras, Y. Aguilar and W. Moya. 2024. Land suitability of coffee cultivation under climate change influence in the Ecuadorian Amazon. *Geography, Environment, Sustainability* 17(2):49-62. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-2969>
- Prisa, D. and A. Jamal. 2025. Vermicompost in agricultural production: Mechanisms, importance, and applications. *Multidisciplinary Reviews* 8(11). <https://doi.org/10.31893/multirev.2025325>
- Qin, S. and Y. Zhang. 2025. Earthworm abundance increases aggregate stability: A field study in a Mediterranean agroforestry system. *Applied Soil Ecology* 206:105903. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105903>
- Samarawickrama, U., D. Leelamanie, W. Wijekoon and P. Jayasinghe. 2025. Earthworm dynamics in relation to alterations of vegetation: Effects of oil palm in comparison to rubber and natural forest in tropical Ultisols. *Biologia* 80(5):1269-1282. <https://doi.org/10.1007/s11756-024-01726-1>

- Santa, J. P., M. A. Restrepo, J. I. Montoya, J. A. Giraldo, M. Serna y L. E. Urrego. 2024. Variables ambientales asociadas a la distribución de dos especies de Magnolia (Magnoliaceae) de los Andes colombianos. *Acta Botánica Mexicana* 131. <https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2287>
- Vizuete, M., P. Carrera-Oscullo, N. D. L. M. Barrero-Silva, M. Sánchez, H. F. Figueroa-Saavedra and W. Moya. 2024. Agroecological alternatives for small and medium tropical crop farmers in the Ecuadorian Amazon for adaptation to climate change. *Agricultural Systems* 218:103998. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103998>
- Vizuete, M. O., H. F. Figueroa, A. D. Barbaru, H. A. Zapata, H. R. Herrera and W. Moya. 2024. Physio-edaphoclimatic factors show optimal soil suitability for three tropical crops in the Ecuadorian Amazon. *Scientia Agricola* 81:e20220214. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0214>
- Vizuete-Montero, M., H. F. Figueroa-Saavedra, R. Torres-Castillo and M. Chaglla-Cango. 2025. Seasonal influence of shade on the disease incidence of *Moniliophthora perniciosa* in cocoa: Longitudinal study. *Journal of Natural Pesticide Research* 14:100162. <https://doi.org/10.1016/j.napere.2025.100162>
- Wu, D., E. Du, N. Eisenhauer, J. Mathieu and C. Chu. 2025. Global engineering effects of soil invertebrates on ecosystem functions. *Nature* 120:120-129
- Zhong, L., T. Larsen, S. Scheu and M. Pollierer. 2025. La alta calidad de la hojarasca mejora la canalización de energía de las plantas por parte de los macrodetritívoros del suelo y reduce su posición trófica. *Ecology*. <https://doi.org/10.1002/ecy.70004>.

