



Macroinvertebrados edáficos y su relación con la calidad del suelo en cultivos de *Theobroma cacao* de la comunidad nativa Shampuyacu

Soil macroinvertebrates and their relationship with soil quality in *Theobroma cacao* crops of the native community Shampuyacu

Cristian Wajajay Tentets^a; Maritza Arcelis Zavaleta Díaz^a; Juan José Pinedo Canta^a; Luis Freyder Liñan Escate^{a*}; Edward Isla Ramirez^a; Jhony Alexander Borbor Vargas^a

^a Universidad Nacional de San Martín, Perú.

*Autor correspondiente: L. F. Liñan Escate [lf.linane@unsm.edu.pe | <https://orcid.org/0000-0003-3628-3260>]

C. Wajajay Tentets [bethel.cw@gmail.com | <https://orcid.org/0000-0001-9639-3563>]

M. A. Zavaleta Díaz [arcelis65@hotmail.com | <https://orcid.org/0000-0002-2839-6356>]

J. J. Pinedo Canta [jjpinedo@unsm.edu.pe | <https://orcid.org/0000-0002-7855-3807>]

E. I. Ramirez [islaroldanyramirezperea@hotmail.com | <https://orcid.org/0000-0001-9035-3720>]

J. A. Borbor Vargas [jaborbor@unsm.edu.pe | <https://orcid.org/0000-0001-7100-5333>]

Resumen

Los macroinvertebrados del suelo, como lombrices, insectos, arácnidos y miriápodos, desempeñan funciones elementales en la calidad del suelo al favorecer la descomposición de residuos, la formación de agregados, la porosidad y la infiltración, procesos que sostienen la fertilidad. El objetivo del estudio fue determinar la relación entre los macroinvertebrados y la calidad del suelo en cultivos de *Theobroma cacao*, en dos sistemas de manejo: agroforestal (SAF) y sin manejo agroforestal (SIN SAF). Se establecieron seis parcelas (50 × 20 m) para cada sistema, en cada parcela se tomaron tres monolitos (25 × 25 cm, 30 cm de profundidad) los cuales se fraccionaron en hojarasca y estratos de suelo de 0–10, 10–20 y 20–30 cm. Los macroinvertebrados fueron extraídos manualmente, preservados e identificados a nivel de clase, orden o familia. Se midieron propiedades del suelo (pH, CE, materia orgánica, N, P, K, CIC, Ca, Mg, Al³⁺, textura) y se estimó un índice de calidad mediante normalización de indicadores. En total se recolectaron 2 619 macroinvertebrados; 55,86% en SAF y 44,14% en sin SAF. Los resultados mostraron una mayor abundancia y diversidad en SAF, con correlaciones positivas significativas con pH, Ca y Mg, y negativas con Al³⁺. Finalmente se concluye que la presencia de Isóptera resultó indicadora de acidez, así también de suelos bajos en calcio y magnesio, mientras que Isópoda resultó indicador de suelos con pH que tienden a la neutralidad y niveles altos en calcio y magnesio, como también de niveles bajos de Al³⁺, igual que Araneae y Geophilomorpha. Los órdenes Araneae, Isópoda y Geophilomorpha presentaron relación positiva y significancia estadística con el índice de calidad del suelo.

Palabras clave: Biodiversidad; Ecosistema amazónico; agroecosistema; Agroforestal.

Abstract

Soil macroinvertebrates, earthworms, insects, arachnids, and myriapods, perform core functions that underpin soil quality by accelerating residue decomposition, aggregate formation, porosity, and infiltration, thereby sustaining fertility. We assessed the relationship between macroinvertebrates and soil quality in cacao (*Theobroma cacao*) under two management systems: agroforestry (AFS) and non-agroforestry (non-AFS). Six 50 × 20 m plots were established per system; in each plot, three monoliths (25 × 25 cm; 30 cm depth) were collected and partitioned into litter and soil layers of 0–10, 10–20, and 20–30 cm. Macroinvertebrates were hand-sorted, preserved, and identified to class, order, or family. Soil properties (pH, EC, organic matter, N, P, K, CEC, Ca, Mg, Al³⁺, texture) were measured, and a soil quality index was computed after indicator normalization. In total, 2 619 macroinvertebrates were collected: 55.86% in AFS and 44.14% in non-AFS. Abundance and diversity were higher in AFS and showed significant positive correlations with pH, Ca, and Mg, and negative correlations with Al³⁺. Termites (Isoptera) indicated acidic soils with low Ca and Mg, whereas isopods (Isopoda) indicated soils trending toward neutral pH with high Ca and Mg and low Al³⁺, as did Araneae and Geophilomorpha. The orders Araneae, Isopoda, and Geophilomorpha showed positive, statistically significant associations with the soil quality index.

Keywords: Biodiversity; Amazon ecosystem; agroecosystem; Agroforestry.



1. Introducción

El suelo constituye la base del sistema agroalimentario, sostiene la producción agrícola (Lal, 2016), regula el ciclo hidrológico y es considerado el reservorio más grande de carbono (Huamán-Carrión et al., 2021), mientras mantiene redes tróficas que soportan la fertilidad y resiliencia del agroecosistema (Schoonover & Crim, 2015). En la Amazonía peruana, la comunidad nativa Shampuyacu, región San Martín, ha impulsado el cultivo de *Theobroma cacao* como estrategia de recuperación de áreas degradadas, incluyendo antiguos pastizales y barbechos. Comprender cómo responde los macroinvertebrados del suelo ante diferentes manejos agrícolas es clave para orientar decisiones de conservación y sostenibilidad agrícola del país.

Desde hace más de tres décadas, el concepto de calidad del suelo integra atributos físicos, químicos y biológicos (Abuzaid et al., 2021), para evaluar la capacidad del suelo de cumplir funciones ecosistémicas esenciales, entre ellas el soporte a la biodiversidad (Zheng et al., 2022), la provisión de nutrientes, la regulación del agua y el resguardo del bienestar humano (Moges et al., 2013). Sin embargo, las presiones antrópicas como la deforestación, el uso intensivo de agroquímicos y la afectación del hábitat, han impactado dichas funciones (Karr, 2008). Estas presiones modifican el microclima, fragmentan la cobertura vegetal e impactan la diversidad biológica (da Silva et al., 2019), con efectos adversos sobre la estabilidad del suelo (Barnes et al., 2014).

Los macroinvertebrados edáficos intervienen en procesos críticos como la fragmentación de la hojarasca, la bioturbación, la formación de agregados, la porosidad y la infiltración (Mhlanga et al., 2022). En conjunto, estos procesos sostienen la ciclicidad del carbono y del nitrógeno y catalizan la actividad microbiana (X. Yang et al., 2020; Zavaleta (2019). La estructura de sus comunidades responde a gradientes ambientales y de manejo. La temperatura, la humedad, la calidad y cantidad de hojarasca, la textura y la disponibilidad de bases intercambiables condicionan su distribución y desempeño (Yang et al., 2020). En paisajes andino-amazónicos, la altitud y la heterogeneidad del hábitat modulan la composición taxonómica de la macrofauna, lo que refuerza la pertinencia de evaluaciones locales y comparativas (Rojas-Múnera et al., 2021).

La agricultura convencional, caracterizada por laboreo frecuente, monocultivo, altas entradas de nitrógeno y uso intensivo de pesticidas, se asocia con simplificación de la red trófica y pérdida de biodiversidad, con impactos negativos sobre procesos de C y N (Tsiafouli et al., 2015). El laboreo y tránsito de maquinaria

incrementan la compactación, reducen la macroporosidad e infiltración, y fragilizan la estructura del suelo (Nawaz et al., 2013). La fertilización nitrogenada favorece la acidificación y la mayor disponibilidad de Al^{3+} con efectos fitotóxicos y pérdida de bases (Zhao & Shen, 2018). A la inversa, prácticas como cultivos de cobertura y agroforestería mejoran la estructura, la actividad biológica y la diversidad de la macrofauna, con evidencia específica en sistemas de cacao agroforestal en la región (Koudahe et al., 2022). Los sistemas agroforestales, por su mayor complejidad estructural, aporte continuo de residuos y microclima estable, favorecen la diversidad y la abundancia de macrofauna en comparación con sistemas agrícolas convencionales. Estos sistemas también incrementan el secuestro de carbono en biomasa y suelo (Santos et al., 2016; Zavala et al., 2018; Carvalho et al., 2023). No obstante, subsiste una brecha de evidencia cuantitativa en la amazonia peruana sobre la variación de la macrofauna edáfica en cacao con y sin agroforestería y sobre la forma en que dichas variaciones se relacionan con indicadores de calidad del suelo, entre ellos pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, aluminio intercambiable y nutrientes disponibles.

Debido a la importancia de valorar y cuidar a los macroinvertebrados del suelo en ecosistemas de la selva peruana, mediante el presente estudio se planteó como objetivo, evaluar la relación entre los macroinvertebrados y la calidad del suelo en cultivos de *Theobroma cacao* de la comunidad nativa Shampuyacu, comparando sistemas agroforestales (SAF) y no agroforestales (sin SAF), a partir de la caracterización taxonómica y de abundancia de macroinvertebrados por estratos del suelo, así como el análisis de asociación con propiedades fisicoquímicas e índice de calidad del suelo.

2. Metodología

2.1. Área de estudio y diseño muestral

El estudio se ubicó dentro de la comunidad nativa Shampuyacu (región San Martín, Perú), donde se identificaron 12 parcelas con cultivos de *Theobroma cacao*, georreferenciadas con apoyo de la organización Conservación Internacional (Figura 1). Se evaluaron dos sistemas de manejo: seis parcelas con sistema agroforestal (SAF) y seis parcelas sin sistema agroforestal (sin SAF). La selección consideró terrenos planos, no inundables, y la edad del cultivo. Cada parcela de estudio tuvo dimensiones de 50 × 20 m (1000 m²), delimitada con rafia y subdividida en 10 cuadrículas de 10 m x 10 m para el muestreo de macrofauna y suelos (figuras 2 y 3).

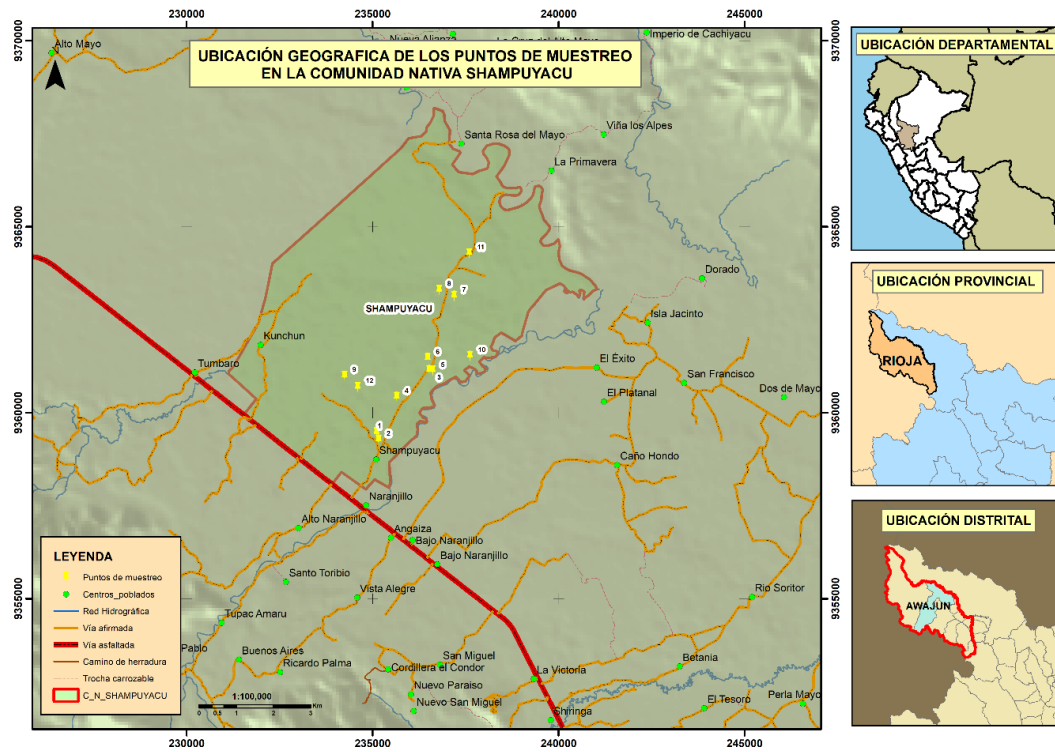


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica de puntos de muestreo.

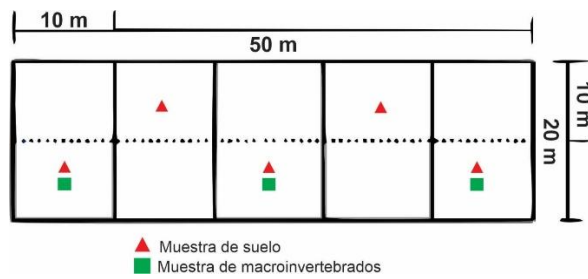


Figura 2. Diagrama de distribución de parcela de estudio.



Figura 3. Delimitación de parcela de estudio con área de 50 m × 20 m.

2.2. Muestreo de macroinvertebrados del suelo

En cada parcela se extrajeron tres monolitos (unidad muestral) de 25 cm × 25 cm y 30 cm de profundidad siguiendo el protocolo TSBF (Zavaleta, 2019). Cada monolito se fraccionó en cuatro estratos: hojarasca, 0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm. El muestreo se efectuó entre 06:00 y 10:00 horas de la mañana para evitar horas de mayor temperatura. Los macroinvertebrados visibles (>2 mm) se extrajeron manualmente, se conservaron en alcohol 70% + glicerina 5% (insectos y otros de cuerpo endurecido) o formol 5% (anélidos), y se rotularon con fecha, código de parcela y sistema de manejo. La identificación taxonómica a nivel de clase, orden y familia se realizó en laboratorio con estereoscopio, lupas, pinzas finas y cámara fotográfica, registrando las observaciones en fichas técnicas y matrices de datos.

2.3. Muestreo y análisis de suelos

En cada parcela se obtuvieron cinco submuestras compuestas, extraída hasta 30 cm de profundidad para luego ser homogeneizadas y conformar 1 kg de suelo destinado a laboratorio (ICT). Se determinaron pH (suspensión suelo:agua 1:2,5), conductividad eléctrica, materia orgánica (Walkley & Black), N total, P disponible (Olsen mod.), K y Na intercambiables

(absorción atómica), Ca y Mg intercambiables (absorción atómica), capacidad de intercambio catiónico (pH 7), carbonatos (método gas-volumétrico) y textura (hidrómetro).

Se calculó un Índice de Calidad del Suelo (ICS) mediante normalización de indicadores de acuerdo con Cantú et al. (2007). Para cada parámetro obtenido de análisis de suelo se definieron valores máximos (Imax) y mínimos (Imin) y se asignaron clases de calidad según escala de 0,00–1,00 y agrupadas en cinco categorías (muy baja a muy alta).

Los monolitos marcados y extrayéndose cuidadosamente la porción de suelo correspondiente a cada estrato (hojarasca, de 0 a 10 cm, de 10 a 20 cm y de 20 a 30 cm), fueron colocadas en bolsas plásticas gruesas y rotuladas para luego ser trabajadas en bandeja y proceder con la identificación de los macroinvertebrados visibles al ojo humano (tamaño >2 mm), estos se iban separando y colocando en medio líquido, el primero con alcohol al 70% y glicerina al 5% para cuerpos endurecidos, mientras que para anélidos se utilizó formol al 5%. Cada frasco con medio y macroinvertebrados fueron respectivamente rotulados con fecha, código de parcela y sistema de manejo del cultivo.



Figura 4. Delimitación de monolito con dimensión de 25 cm × 25 cm x 30 cm.

2.4. Clasificación de macroinvertebrados

Los macroinvertebrados identificados fueron clasificados en clase, orden o familia. Para manipulación de las muestras se emplearon frascos, pinzas, lupa entomológica y pinceles, esto realizado en el laboratorio de la Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, haciendo uso de un estereoscopio, caja petri y cámara fotográfica, posterior a ello se determinó la diversidad y población de macroinvertebrados en cultivos de *Theobroma cacao*. En cada monolito se realizó el muestreo de macroinvertebrados, datos que se registraron en la ficha técnica, después se procesaron en una hoja Excel para la elaboración de tablas y gráficos, considerando el nivel de clase, orden o familia.

Tabla 1

Valores de escala según Índice de calidad de suelo

Índices de calidad del suelo	Escala	Clase
Muy alta calidad	0,80 – 1,00	1
Alta calidad	0,60 – 0,79	2
Moderada calidad	0,40 – 0,59	3
Baja calidad	0,20 – 0,39	4
Muy baja calidad	0,00 – 0,19	5

Nota: Tomado de Cantú et al. (2007).

Cantú et al. (2007) menciona que se debe tener en cuenta dos posibilidades:

1. Teniendo el valor máximo del indicador (I_{\max}) haciendo referencia a la mejor condición de calidad de suelo (Valor normalizado del indicador: $V_n = 1$), donde I_{\max} : valor máximo del indicador, I_{\min} : valor mínimo del indicador.

$$V_n = \frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

Este método es estricto solo para índices de calidad en suelos.

2. Cuando se presente un valor máximo (I_{\max}) que represente a la peor situación de calidad en un suelo ($V_n = 0$) el cual se obtiene de la siguiente forma:

$$V_n = 1 - \frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

Donde V_n : valor normalizado, I_m : medida del indicador, I_{\max} : valor máximo del indicador, y I_{\min} : valor mínimo del indicador.

Para los valores máximos y mínimos de los indicadores se tomó como rango valores indicados en la Tabla 2.

Finalmente se realizó un análisis de correlación de Spearman, debido a que los datos no presentaron una distribución normal, según prueba de Shapiro-Wilk, para medir el coeficiente de correlación “ r ” de los datos obtenidos, los cuales se mide el coeficiente de correlación de la siguiente manera (Sanchez, 2020):

Correlación negativa perfecta: $r = -1$

Correlación negativa fuerte moderada débil: $r = -0,5$

Ninguna correlación: $r = 0$

Correlación positiva moderada Fuerte: $r = +0,5$

Correlación positiva perfecta: $r = +1$

Con los datos recolectados de la presencia de macroinvertebrados en el suelo, se realizó el método integral para evaluar la salud ecológica de un ecosistema, mediante la comparación de datos obtenidos por los respectivos análisis de suelos, tomando datos como el contenido de materia orgánica, contenido de nitrógeno, etc., y relacionándolos con el contenido de macrofauna edáfica encontradas en cada suelo en estudio.

2.5. Análisis de datos

Se utilizó el programa SPSS 27, a través del cual se analizó la normalidad de los datos, posterior a ello se utilizó el estadístico de Spearman para valores con distribución normal.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de macroinvertebrados presentes en cultivos de “cacao”

A nivel de clase sobresalió Oligochaeta, con una mayor presencia en parcelas con SAF, 254 individuos, mientras que en los cultivos sin SAF se encontró 188 individuos, mientras que la clase Diplopoda se encontró 1 individuo en una parcela sin SAF. Para ambos casos no se evidenció significancia estadística.

En las doce parcelas se contabilizaron 722 macroinvertebrados pertenecientes a diez órdenes. Siendo las más abundantes, Isoptera (506 individuos), seguida por Coleoptera (94 individuos), Araneae (36 individuos) e Isopoda (27 individuos) contribuyeron con el 91,83%, mientras que Hemíptero (24 individuos), Blattodea (20 individuos) y Geophilomorpha (11 individuos) fueron menos abundantes. Diptera, Lepidoptera y Trombidiformes se registraron de forma esporádica ($\leq 0,3\%$).

A nivel de orden se evidencian correlaciones significativas con el índice de calidad de suelos (ICS) y algunos parámetros fisicoquímicos del suelo (Tabla 3):

- Isópoda presentó correlaciones positivas y significativas con el ICS (+0,703), también con parámetros de pH (menor acidez) y con bases intercambiables (Ca y Mg), y negativa con Al^{3+} .
- Isóptera mostró el patrón opuesto: asociaciones negativas y significativas con pH, Ca y Mg, y positivas (o menos desfavorables) con Al^{3+} , sin embargo, no mostró una correlación significativa con el ICS.
- Araneae se asocia positivamente con el ICS (+0,621), igualmente a valores de pH, Ca y Mg.
- Geophilomorpha se asocia positivamente con el ICS (+0,723), también a pH, Ca, Mg, y de forma negativa con el Al^{+3} .

Tabla 2

Parámetros obtenidos de análisis de suelos y ICS

PARCELA	SISTEMA	pH	CE	MO	N	P	K	CIC	Ca	Mg	Al+3	ICS
1	SAF	4,67	0,07	2,74	0,14	8,58	38,79	15,63	1,87	0,6	3,8	0,29543
2	SAF	4,33	0,05	2,39	0,12	13,6	21	15,64	1,37	0,36	5,9	0,21959
3	SAF	4,75	0,05	2,89	0,14	33	35	10,37	2,62	0,6	2,6	0,39840
4	SAF	5,62	0,06	3,84	0,19	30,8	32	11,08	7,68	1,04	0	0,73548
5	SAF	5,58	0,05	3,58	0,18	8	34	9,4	6,05	0,99	0	0,59887
6	SIN SAF	4,82	0,05	3,52	0,18	7,6	19	10,81	2,61	0,5	2,8	0,36678
7	SAF	5,04	0,05	3,85	0,19	15,6	39	13,28	5,24	0,88	1,6	0,62229
8	SIN SAF	4,73	0,06	3,65	0,18	4,8	27	12,4	3,8	0,46	2,5	0,39029
9	SIN SAF	4,54	0,06	3,11	0,16	11	71	10,25	1,5	0,5	4,2	0,34078
10	SIN SAF	4,63	0,05	2,91	0,15	8	47	13,1	2,07	0,44	3,4	0,34950
11	SIN SAF	4,55	0,06	3,51	0,18	13,8	29	11,49	0,87	0,28	4,2	0,30667
12	SIN SAF	4,34	0,04	3,9	0,19	12,8	47	14,76	1,1	0,28	5,2	0,48335
MIN		4,33	0,04	2,39	0,12	4,8	19	9,4	0,87	0,28	0	
MAX		5,62	0,07	3,9	0,19	33	71	15,64	7,68	1,04	5,9	

Nota. ICS, índice de calidad de suelo.

Tabla 3

Spearman para macroinvertebrados nivel orden

Orden		pH	CE	MO	N	P	K	CIC	Ca	Mg	Al+3	ICS
Coleopteros	Correlación	-0,02	-0,20	0,25	0,30	0,08	-0,31	0,26	-0,09	-0,07	0,07	0,08
	Sig.	0,95	0,52	0,43	0,34	0,80	0,32	0,42	0,79	0,82	0,83	0,80
Blattodea	Correlación	-0,13	-0,01	-0,07	-0,11	0,07	-0,43	-0,08	-0,09	-0,35	0,01	-0,07
	Sig.	0,69	0,99	0,83	0,74	0,82	0,16	0,81	0,77	0,27	0,99	0,83
Hemiptera	Correlación	0,24	0,07	-0,03	-0,04	0,07	-0,28	-0,44	0,30	0,27	-0,20	0,13
	Sig.	0,44	0,83	0,94	0,90	0,84	0,37	0,15	0,35	0,39	0,53	0,69
Araneae	Correlación	0,694*	-0,07	0,36	0,27	0,03	-0,18	-0,50	0,76**	0,595*	-0,759**	0,621*
	Sig.	0,01	0,82	0,25	0,39	0,93	0,59	0,09	0,00	0,04	0,00	0,03
Isopoda	Correlación	0,695*	-0,23	0,22	0,21	0,56	0,09	-0,39	0,695*	0,73**	-0,701*	0,703*
	Sig.	0,01	0,47	0,48	0,50	0,06	0,79	0,21	0,01	0,00	0,01	0,01
Geophilomorpha	Correlación	0,723**	0,13	0,40	0,35	0,26	-0,19	-0,34	0,832**	0,64*	-0,821**	0,723**
	Sig.	0,01	0,69	0,19	0,26	0,42	0,55	0,29	0,00	0,02	0,00	0,00
Isoptera	Correlación	-0,594*	-0,34	-0,07	-0,10	-0,02	0,21	0,00	-0,598*	-0,683*	0,50	-0,25
	Sig.	0,04	0,29	0,83	0,77	0,96	0,50	0,99	0,04	0,01	0,10	0,43
Diptera	Correlación	0,13	-0,19	-0,31	-0,36	0,48	0,04	-0,31	0,13	0,18	-0,13	0,13
	Sig.	0,68	0,55	0,33	0,25	0,11	0,89	0,33	0,68	0,59	0,68	0,68
Lepidoptera	Correlación	0,39	0,42	0,39	0,37	-0,06	-0,32	-0,06	0,52	0,26	-0,49	0,39
	Sig.	0,21	0,17	0,21	0,24	0,84	0,30	0,84	0,08	0,41	0,11	0,21
Trombidiformes	Correlación	0,48	0,29	0,31	0,40	0,39	-0,13	-0,13	0,48	0,48	-0,44	0,48
	Sig.	0,11	0,37	0,33	0,19	0,21	0,68	0,68	0,11	0,11	0,15	0,11

Nota. n = p < 0,05 (*), p < 0,01 (**).

En las doce parcelas se registraron 1454 individuos correspondientes a ocho familias identificadas, de la cual se evidencio una dominancia de Formicidae con 1 418 individuos (97,5%). En un segundo lugar Staphylinidae con 18 individuos (1,2%) con presencia en 7/12 parcelas, y Gelastocoridae 13 individuos. Las familias restantes (Cicadillea, Elateridae, Dystiscidae, Scolopendromorpha y Orthoptera) se detectaron de forma esporádicos (1 individuo cada uno).

La correlación de Spearman entre familias seleccionadas y propiedades del suelo (Tabla 4) muestra a Staphylinidae con correlación positivamente

a pH (+0,648; +0,023), Ca (p +0,618; +0,032) y negativamente con Al³⁺ (-0,700); Formicidae mostró relación positiva con CE (+0,613). Sin embargo, a nivel de familia no se evidenció correlaciones significativas entre los macroinvertebrados identificados y el ICS.

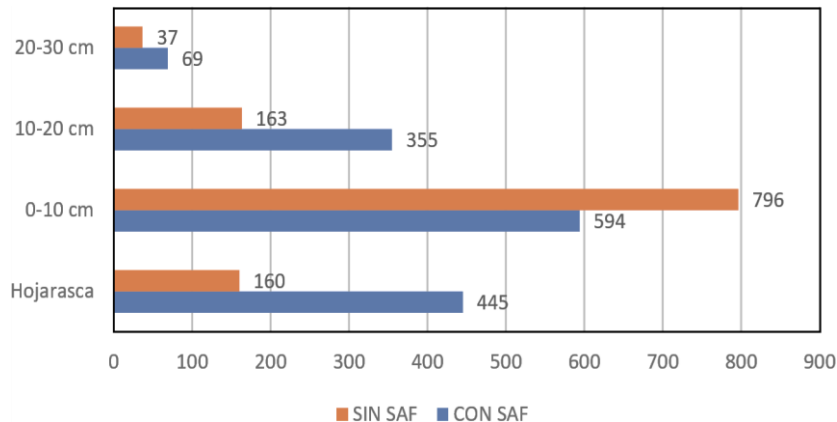
La distribución de macroinvertebrados en los diferentes estratos de monolitos, encontraron los máximos números de individuos en 0–10 cm, seguido de hojarasca, 10-20 cm y 20–30 cm con el menor valor de individuos. Encontrándose una densidad de 3901 individuos/m² en sistemas con SAF y 3082 individuos/m² en sistemas sin SAF.

Tabla 4

Spearman para macroinvertebrados a nivel de Familia

Familia		pH	CE	MO	N	P	K	CIC	Ca	Mg	Al ⁺³	ICS
Formicidae	Correlación	0,39	0,61*	-0,22	-0,12	-0,03	0,01	-0,50	0,29	0,48	-0,39	0,00
	Sig.	0,20	0,03	0,499	0,70	0,92	0,98	0,10	0,35	0,12	0,22	1,00
Gelastocoridae	Correlación	-0,18	0,08	-0,64*	-0,65*	-0,33	0,05	-0,26	-0,14	0,13	0,25	-0,50
	Sig.	0,56	0,81	0,02	0,02	0,30	0,88	0,42	0,66	0,68	0,44	0,09
Staphylinidae	Correlación	0,64*	0,21	0,52	0,57	-0,20	-0,39	-0,24	0,618*	0,30	-0,70*	0,49
	Sig.	0,02	0,51	0,08	0,05	0,54	0,21	0,45	0,03	0,34	0,01	0,10
Cicadillea	Correlación	0,39	-0,19	0,13	0,09	-0,26	-0,04	-0,48	0,39	0,40	-0,44	0,31
	Sig.	0,20	0,55	0,68	0,78	0,41	0,89	0,11	0,21	0,20	0,15	0,33
Elateridae	Correlación	-0,48	-0,19	-0,48	-0,49	0,13	-0,39	0,48	-0,31	-0,31	0,48	-0,48
	Sig.	0,11	0,55	0,11	0,10	0,68	0,20	0,11	0,33	0,33	0,11	0,11
Dystiscidae	Correlación	0,39	-0,19	0,13	0,09	-0,26	-0,04	-0,48	0,39	0,40	-0,44	0,31
	Sig.	0,20	0,55	0,68	0,78	0,41	0,89	0,11	0,21	0,20	0,15	0,33
Scolopendromorpha	Correlación	0,21	-0,19	0,04	0,09	-0,39	-0,48	-0,22	0,04	0,00	-0,04	-0,04
	Sig.	0,49	0,55	0,89	0,78	0,20	0,11	0,50	0,89	1,00	0,89	0,89
Orthoptera	Correlación	-0,21	0,28	-0,04	0,09	0,22	-0,22	-0,04	-0,48	-0,44	0,26	-0,31
	Sig.	0,49	0,36	0,89	0,78	0,49	0,50	0,89	0,11	0,15	0,41	0,33
Diplopoda	Correlación	-0,39	-0,52	0,48	0,40	0,04	0,35	0,31	-0,39	-0,44	0,39	0,22
	Sig.	0,20	0,08	0,11	0,19	0,89	0,26	0,33	0,20	0,15	0,21	0,49

Parámetros del suelo: pH: potencial hidrógeno, CE: Conductividad eléctrica, MO: Materia orgánica (%), N: Nitrógeno (%), P: Fosforo disponible (ppm), K: Potasio intercambiable (ppm), CIC: Capacidad de intercambio catiónico, Ca y Mg: Calcio y magnesio intercambiable, Al⁺³: Aluminio intercambiable (cmol(+)/kg), ICS: Índice de calidad de suelo.

**Figura 5.** Macroinvertebrados en los cuatro estratos trabajados.

Los macroinvertebrados edáficos están comprendidos por grupos muy diversos en características morfológicas, razón por la cual suelen responder de manera diferente a múltiples condiciones físicas, químicas y biológicas, siendo susceptibles al uso de productos químicos y ambientes perturbados (Chassain et al., 2024), en el presente estudio, densidad fue de 3901/ind.m² en parcelas con SAF y de 3082/ind.m² en parcelas sin SAF, para ambos sistemas el orden formicidae fue dominante con el mayor valor de individuos, sin embargo ya en el segundo lugar para sistemas sin SAF se encontraba el orden isóptera con 420 individuos, mientras que en SAF isóptera se encontraba en el tercer lugar y con menor número de individuos (254), considerando que isóptera presentó valores negativos relacionados a pH y elementos base (Ca y Mg).

La calidad del suelo se encuentra relacionado con la diversidad de macroinvertebrados en el suelo, favoreciendo a su resiliencia y mejora productiva de estos ecosistemas (Wang et al., 2025), para el presente estudio se evidencio que Isópoda mantiene correlaciones positivas y altamente significativas de 0,695 y 0,73 para calcio y magnesio respectivamente, así también es buen indicador para ausencia de Al⁺³ (+0,701) y con valores significativos ($p < 0,05$), casos similares ocurrieron con los órdenes Araneae y Geophilomorpha, teniendo en consideración que los suelos donde se realizaron los muestreos se encontraban degradados y se encuentran proceso de recuperación, podemos considerar que los macroinvertebrados del orden Isopoda, Araneae y Geophilomorpha serian indicadores de un ecosistema suelo en recuperación.

Es conocido que macroinvertebrados con características alimentarias de fitófagos y saprófagos suelen estar relacionados negativamente al pH del suelo, mientras que los macroinvertebrados depredador se asocian a una relación positiva de pH (Zhang et al., 2024), lo cual concuerda con los resultados del presente estudio, donde los parámetros pH fue el más determinante y que evidencio relaciones significativas con algunos de los macroinvertebrados, para el caso de un macroinvertebrado fitófago como isóptera que obtuvo valores correlacionales de pH negativo y significativo, caso contrario ocurrió con el orden Araneae que al ser un depredador obtuvo valores positivos y significativos.

Los resultados muestran que los sistemas agroforestales (SAF) sostienen mayor abundancia y diversidad de macroinvertebrados que las parcelas sin SAF. Este patrón es coherente con lo realizado por Visscher et al. (2023) en agroecosistemas de montaña reportaron incrementos significativos en actividad biológica, diversidad y funciones edáficas bajo agroforestería; en cacao, estudios de Costa Rica y la Amazonía colombiana han documentado que los SAF mejoran la calidad del suelo e incorporan a la macrofauna como indicador operativo de dicha calidad. Estos resultados son congruentes con el incremento observado en las parcelas SAF de la investigación realizada.

El aporte continuo de hojarasca en SAF proveen microhábitats, alimento y condiciones microclimáticas favorables para macroinvertebrados. Trabajos realizados por parte de Tinoco-Jaramillo et al. (2024) en cultivos de *Theobroma cacao* demostraron aumentos de presencia de lombrices (Oligochaeta) en SAF, debido a que estas actúan como mejoradoras del ecosistema suelo, promoviendo agregación, porosidad e infiltración y acelerando la descomposición de residuos, lo que coincide con la mayor densidad de la clase Oligochaeta registradas en las parcelas del presente estudio donde el número de especies forestales presentó una correlación altamente significativa (+0,931) con el índice de calidad del suelo, encontrándose un total de 254 individuos en SAF (57,46%) y 188 individuos en sin SAF (42,53%).

Se encontraron correlaciones positivas entre orden Isópoda y pH, Ca y Mg (+0,695, +0,695 y +0,730), y negativas con Al^{3+} (-0,701) intercambiable, además Isópoda solo estuvo presente en parcelas con SAF. Estudios recientes sobre sistemas agroforestales (SAF) reportan pH y cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) más favorables en SAF, con asociaciones estadísticamente significativas entre macrofauna y atributos químicos del suelo (Souty-Grosset & Faberi, 2018), lo cual ayuda a explicar las asociaciones positivas con bases y negativas con Al^{3+} .

4. Conclusiones

Los macroinvertebrados se relacionan con ciertas propiedades químicas de los suelos, actuando como indicadores, entre ellos la presencia de Isoptera en suelo resultó indicador de acides, así también de suelos bajos en calcio y magnesio, mientras que Isopoda resultó indicador de suelos con pH que tienden a la neutralidad y niveles altos en calcio y magnesio, como también de niveles bajos de Al^{3+} , igual que Araneae y Geophilomorpha. Los órdenes Araneae e Isópoda presentaron un relación positiva y significativa con el índice de calidad del suelo, mientras que Geophilomorpha presentaron una relación positiva y altamente significativa con el índice de calidad del suelo.

Referencias bibliográficas

- Abuzaid, A. S., Abdellatif, A. D., & Fadl, M. E. (2021). Modeling soil quality in Dakahlia Governorate, Egypt using GIS techniques. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.01.003>
- Barnes, A. D., Jochum, M., Mumme, S., Haneda, N. F., Farajallah, A., Widarto, T. H., & Brose, U. (2014). Consequences of tropical land use for multitrophic biodiversity and ecosystem functioning. *Nature Communications*, 5, 1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms6351>
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia Del Suelo*, 25(2), 173–178. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v25n2/v25n2a08.pdf>
- Carvalho, F. E. L., Escobar-Pachajoa, L. D., Camargo, I. D., Rojas-Molina, J., Jaimes-Suárez, Y. Y., & Rivera-Meneses, J. J. (2023). The interspecific interactions in agroforestry systems enhance leaf water use efficiency and carbon storage in cocoa. *Environmental and Experimental Botany*, 205(June 2022), 0–2. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105119>
- Chassain, J., Joimel, S., & Vieublé Gonod, L. (2024). A complex relationship between cropping systems and soil macrofauna: Influence of practice intensity, taxa and traits. *Pedobiologia*, 105(June), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150974>
- Chavéz, W. K. (2022). Fertilización bioorgánica y su efecto en la macro fauna de un bosque primario secundario y arenoso Zungarococha, Iquitos 2021. Tesis Maestría. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
- da Silva, L. P., Heleno, R. H., Costa, J. M., Valente, M., Mata, V. A., Gonçalves, S. C., da Silva, A. A., Alves, J., & Ramos, J. A. (2019). Natural woodlands hold more diverse, abundant, and unique biota than novel anthropogenic forests: a multi-group assessment. *European Journal of Forest Research*, 138(3), 461–472. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01183-5>
- Huamán-Carrión, M. L., Espinoza-Montes, F., Barrial-Lujan, A. I., & Ponce-Atencio, Y. (2021). Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83–90. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.010>
- Karr, J. R. (2008). Ecological Health Indicators. *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, 1037–1041. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00897-1>
- Koudahe, K., Allen, S. C., & Djaman, K. (2022). Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>

- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>
- Mhlanga, L., Kapembeza, C., Sithole, R., & Kativu, S. (2022). Variation in ground insect diversity, composition and abundance across land use types in an African savanna, Zimbabwe. *Scientific African*, 16, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01204>
- Moges, A., Dagnachew, M., & Yimer, F. (2013). Land use effects on soil quality indicators: A case study of Abo-Wonsho Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2013/784989>
- Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Rojas-Múnera, D. M., Feijoo-Martínez, A., Molina-Rico, L. J., Zúñiga, M. C., & Quintero, H. (2021). Differential impact of altitude and a plantain cultivation system on soil macroinvertebrates in the Colombian Coffee Region. *Applied Soil Ecology*, 164(February). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103931>
- Sanchez, C. (2019). *Macroinvertebrados del suelo colonizadores de la necromasa en plantaciones de especies maderables y bosques secundarios de tierra firme, Iquitos-Perú* [Universidad Nacional de Iquitos].
- Sanchez, F. (2020). *Estadística para tesis y uso del SPSS* (Centrum Le).
- Santos, D. P., Santos, G. G., dos Santos, I. L., Schossler, T. R., Niva, C. C., & Marchão, R. L. (2016). Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1466–1475. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900045>
- Schoonover, J. E., & Crim, J. F. (2015). An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154(1), 21–47. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2015.03186.x>
- Souty-Grosset, C., & Faberi, A. (2018). Effect of agricultural practices on terrestrial isopods: A review. *ZooKeys*, 2018(801), 63–96. <https://doi.org/10.3897/zookeys.801.24680>
- Tinoco-Jaramillo, L., Vargas-Tierras, Y., Habibi, N., Caicedo, C., Chanaluisa, A., Paredes-Arcos, F., Viera, W., Almeida, M., & Vásquez-Castillo, W. (2024). Agroforestry Systems of Cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the Ecuadorian Amazon. *Forests*, 15(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/f15010195>
- Tsiafouli, M. A., Thébault, E., Sgardelis, S. P., de Ruiter, P. C., van der Putten, W. H., Birkhofer, K., Hemerik, L., de Vries, F. T., Bardgett, R. D., Brady, M. V., Bjornlund, L., Jørgensen, H. B., Christensen, S., Hertefeldt, T. D., Hotes, S., Gera Hol, W. H., Frouz, J., Liiri, M., Mortimer, S. R., ... Hedlund, K. (2015). Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 21(2), 973–985. <https://doi.org/10.1111/gcb.12752>
- Visscher, A., Meli, P., Fonte, S., Bonari, G., Zerbe, S., & Wellstein, C. (2023). Agroforestry enhances biological activity, diversity and soil-based ecosystem functions in mountain agroecosystems of Latin America: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 30(1), e17036. <https://doi.org/10.1111/gcb.17036>
- Wang, Y., Ren, J., Zhao, W., He, Z., Chen, L., Ren, W., & Liu, J. (2025). Soil macrofauna trophic structure and its relationship with soil factors in oases of contrasting cultivation ages. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 377(5), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109277>
- Yang, X., Shao, M., & Li, T. (2020). Effects of terrestrial isopods on soil nutrients during litter decomposition. *Geoderma*, 376, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114546>
- Yang, Y., Wu, Q., Yang, W., Wu, F., Zhang, L., Xu, Z., Liu, Y., Tan, B., Li, H., & Zhou, W. (2020). Temperature and soil nutrients drive the spatial distributions of soil macroinvertebrates on the eastern Tibetan Plateau. *Ecosphere*, 11(3). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3075>
- Zavala, W., Merino, E., & Peláez, P. (2018). Influence of three agroforestry systems of cocoa cultivation on carbon capture and storage. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 493–501. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.04>
- Zavaleta, M. (2019). Macrofauna y propiedades físicas y químicas del suelo en cultivos de café del Distrito de Jepelacio-Moyobamba, 2017. In *Unidad de posgrado en ciencias biológicas*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Zhang, S., Tong, C., Wang, T., & Xue, L. (2024). Variations of the soil macrofauna community and corresponding influencing factors in the newly reclaimed coastal area: A case study in Yangtze Estuary, China. *Global Ecology and Conservation*, 52(5), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02979>
- Zhao, X. Q., & Shen, R. F. (2018). Aluminum–nitrogen interactions in the soil–plant system. *Frontiers in Plant Science*, 9(June), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00807>
- Zheng, P., Jiang, X., Shu, F., Li, Z., Zhang, S., Alahuhta, J., & Heino, J. (2022). Loss of lateral hydrological connectivity impacts multiple facets of molluscan biodiversity in floodplain lakes. *Journal of Environmental Management*, 320(July), 115885. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115885>