






Caracterización fisicoquímica, mineral y enzimática de humus elaborado con bovinaza y *Eichhornia crassipes* como potencial enmienda orgánica

Physicochemical, mineral, and enzymatic characterization of humus produced from cattle manure and *Eichhornia crassipes* as a potential organic soil amendment

Ever Darío Morales-Avenidaño^{1*} , Sandra Lourdes Lata-Quinchi¹ , Adriana Nicolle Córdova-Muguerza¹ ,

Jeniffer Karolina Valencia-Marcillo¹ , Manuel Ángel Vélez-Sabando¹ 

RESUMEN

El estudio caracterizó la composición proximal, mineral, presencia de Cd y Pb, materia orgánica y actividad enzimática de abonos y humus elaborados a partir de bovinaza y lechuguín (*Eichhornia crassipes*) como potenciales enmiendas orgánicas. La investigación se realizó en una finca ubicada en el sector La Pastora, Tosagua, Manabí, Ecuador. Se evaluaron tres mezclas de bovinaza:lechuguín 1:1, 2:1 y 3:1 para la producción de abono orgánico y posterior vermicompostaje con *Eisenia foetida*. Además, se caracterizaron mezclas de humus con tierra de embanque en cinco proporciones. Se analizaron proteína, grasa, ceniza, fibra, carbohidratos, materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, B, Fe, Zn, Mn, Cd, Pb, catalasa y ureasa. La bovinaza presentó mayor contenido de ceniza, fibra y macronutrientes, mientras que el lechuguín destacó por su contenido de carbohidratos y materia orgánica. El humus al 100% mostró el patrón descriptivo más favorable de N, P y K en las mezclas con tierra de embanque. La actividad ureásica incrementó el pH de 7.00 a 9.50, y la catalasa varió entre 12 y 22 mL O₂ min⁻¹. Como hallazgo crítico, el Cd en bovinaza fue de 0.56 mg kg⁻¹, por lo que requiere control antes de recomendar su uso agrícola. Los resultados aportan una base inicial para seleccionar materiales orgánicos con potencial como enmienda, aunque se requieren estudios de estabilidad, inocuidad y validación agronómica.

Palabras clave: vermicompost, bovinaza, *Eichhornia crassipes*, humus, metales pesados, actividad enzimática.

ABSTRACT

This study characterized the proximate composition, mineral content, presence of Cd and Pb, organic matter, and enzymatic activity of composts and humus produced from cattle manure and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as potential organic soil amendments. The research was conducted on a farm located in the La Pastora sector, Tosagua, Manabí, Ecuador. Three mixtures of cattle manure and water hyacinth (1:1, 2:1, and 3:1) were evaluated for the production of organic fertilizer and subsequent vermicomposting with *Eisenia foetida*. Additionally, mixtures of humus and embankment soil were characterized in five proportions. Protein, fat, ash, fiber, carbohydrates, organic matter, N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, B, Fe, Zn, Mn, Cd, Pb, catalase, and urease were analyzed. Cattle manure had higher ash, fiber, and macronutrient content, while lechuguín stood out for its carbohydrate and organic matter content. The 100% humus mixture showed the most favorable profile for N, P, and K in the mixtures with embankment soil. Urease activity increased the pH from 7.00 to 9.50, and catalase activity ranged from 12 to 22 mL O₂ min⁻¹. A critical finding was that Cd in cattle manure was 0.56 mg kg⁻¹, thus requiring control measures before recommending its agricultural use. The results provide an initial basis for selecting organic materials with potential as soil amendments, although studies on stability, safety, and agronomic validation are required.

Keywords: vermicompost, cattle manure, *Eichhornia crassipes*, humus, heavy metals, enzymatic activity.

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Feliz López, Calceta, Ecuador.

*Autor de correspondencia. E-mail: edmorales@espam.edu.ec

I. INTRODUCCIÓN

La intensificación agrícola y pecuaria ha incrementado la generación de residuos orgánicos y la demanda de fertilizantes, lo que plantea desafíos ambientales y productivos asociados con la gestión de nutrientes. En los últimos años, el uso creciente de fertilizantes químicos ha sido relacionado con deterioro de la calidad del suelo, pérdida de eficiencia en el uso de nutrientes y riesgos de contaminación cuando su aplicación no responde a criterios técnicos. Durante la última década, el uso mundial de pesticidas y fertilizantes aumentó aproximadamente 60% y 50%, respectivamente, mientras que el incremento de los rendimientos fue cercano al 50%, lo que evidencia la necesidad de optimizar la fertilización y promover alternativas basadas en el reciclaje de residuos orgánicos.

En este contexto, las enmiendas orgánicas elaboradas a partir de residuos vegetales y animales han adquirido importancia por su capacidad potencial para aportar materia orgánica, macroelementos, microelementos y compuestos que favorecen la actividad biológica del suelo. Estas enmiendas incluyen estiércoles, compost, vermicompost, residuos vegetales y otros materiales biotransformados, cuya utilidad depende de su composición, estabilidad, madurez, seguridad química y condiciones de aplicación. Aunque pueden contribuir a mejorar atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, también pueden contener metales pesados, residuos veterinarios, patógenos u otros contaminantes, por lo que su caracterización previa resulta indispensable antes de proponer su uso agrícola (Qi et al., 2023).

La bovinaza constituye una materia prima de interés para la elaboración de abonos orgánicos, debido a su contenido de materia orgánica y nutrientes asociados con los ciclos de N, P y K. Sin embargo, su manejo inadecuado puede generar eutrofización de cuerpos de agua, emisiones de gases de efecto invernadero y acumulación de metales pesados en el suelo. Por ello, las estrategias de compostaje y vermicompostaje permiten transformar este residuo en un recurso de mayor valor agronómico, siempre que se controle su composición química y su inocuidad (Qi et al., 2023).

De manera complementaria, el lechuguín (*Eichhornia crassipes*) representa una biomasa acuática de alta disponibilidad en ambientes tropicales y subtropicales. Aunque es reconocida como una especie invasora con efectos ecológicos y socioeconómicos negativos, su biomasa puede valorizarse como insumo para compost, vermicompost, biochar o enmiendas orgánicas. Canning et al. (2025) reportan que *Eichhornia crassipes* contiene nutrientes relevantes para la fertilidad del suelo, con rangos aproximados de 0.7–1.9% de N, 0.1–0.3% de P y 1.4–2.7% de K; no obstante, su composición varía según el ambiente de crecimiento, el método de procesamiento y la mezcla con otros materiales orgánicos.

El aprovechamiento agrícola del lechuguín requiere especial cautela, debido a su capacidad de acumular elementos presentes en el agua, incluidos metales como Fe, Zn, Mn, Cu, Pb o Ni. Por esta razón, la literatura reciente insiste en la necesidad de realizar evaluaciones específicas de nutrientes y metales antes de recomendar productos derivados de *Eichhornia crassipes* como enmiendas agrícolas. Tibebe et al. (2025), al evaluar compost elaborado con jacinto de agua y estiércol bovino, analizaron pH, humedad, conductividad eléctrica, N, P, carbono orgánico, bases intercambiables y metales pesados como Zn, Cd, Pb, Cu, Fe y Mn, y concluyeron que, aunque el material presentó potencial como enmienda, su uso requiere control de calidad y estrategias de mejora nutricional. El vermicompostaje con lombrices del género *Eisenia* constituye una alternativa biotecnológica para transformar residuos orgánicos en humus, mediante la acción conjunta de lombrices y microorganismos. Este proceso puede favorecer la fragmentación del sustrato, la estabilización parcial de la materia orgánica, la mineralización de nutrientes y la generación de materiales con actividad biológica. No obstante, el valor final del humus depende del tipo de residuo empleado, la proporción de mezcla, el tiempo de procesamiento, la humedad, la aireación y la calidad inicial de las materias primas. En consecuencia, no basta con producir humus; es necesario caracterizarlo químicamente, evaluar su actividad enzimática y verificar la presencia de metales pesados antes de

considerarlo como enmienda orgánica.

Los estudios recientes han avanzado en la evaluación del compost de lechuguín como estrategia de manejo de malezas acuáticas y mejoramiento del suelo. Gezahegn et al. (2024) reportaron que el compost de *Eichhornia crassipes* alcanzó un índice de germinación superior al 80%, incrementó el pH del suelo hasta en 0.69 unidades, redujo la densidad aparente en 10.3% y aumentó el carbono orgánico, N total, P disponible, capacidad de intercambio catiónico y K intercambiable en 24.3%, 28.6%, 80.2%, 26.2% y 112.7%, respectivamente. Sin embargo, esos resultados corresponden a ensayos de campo con compost y fertilizante mineral, mientras que aún son limitadas las investigaciones que caracterizan mezclas de bovinaza y *Eichhornia crassipes* transformadas mediante vermicompostaje y evaluadas en términos proximales, minerales, enzimáticos y de metales pesados.

En este sentido, el problema específico no radica solo en producir abonos orgánicos, sino en conocer si las mezclas elaboradas con bovinaza y lechuguín presentan una composición compatible con su potencial uso como enmienda. Esta información es necesaria porque la calidad de un material orgánico no puede inferirse únicamente a partir de su origen natural; debe sustentarse en parámetros como proteína, grasa, ceniza, fibra, carbohidratos, materia orgánica, macroelementos, microelementos, Cd, Pb y actividad enzimática. Además, dado que el estudio se desarrolló en una finca productora de cacao, la determinación de Cd y Pb resulta relevante como criterio preventivo; sin embargo, el presente trabajo no evaluó la respuesta del cultivo ni permite establecer efectos sobre rendimiento o calidad del cacao.

Por tanto, el vacío científico que aborda esta investigación se relaciona con la escasa información integrada sobre la caracterización proximal, mineral, enzimática y de metales pesados de abonos y humus elaborados a partir de mezclas de bovinaza y *Eichhornia crassipes*, así como de mezclas de humus con tierra de embanque. A diferencia de estudios enfocados en respuesta de cultivos o aplicación directa en campo, esta investigación se delimita a

la caracterización del material orgánico y de sus mezclas, como paso previo para futuras evaluaciones agronómicas.

Dado el alcance descriptivo y experimental del estudio, no se plantea una hipótesis causal sobre productividad vegetal. Como hipótesis de trabajo, se asumió que las proporciones de bovinaza y lechuguín podrían modificar la composición proximal, mineral y enzimática del abono orgánico y del humus, y que el incremento de humus en las mezclas con tierra de embanque podría modificar el contenido de nutrientes y metales pesados.

El objetivo del estudio fue caracterizar la composición proximal, mineral, presencia de Cd y Pb, materia orgánica y actividad enzimática de abonos y humus elaborados a partir de mezclas de bovinaza y *Eichhornia crassipes*, así como de mezclas de humus con tierra de embanque, como aproximación inicial para valorar su potencial uso como enmienda orgánica. El aporte esperado es generar una base de evidencia composicional y biológica que permita seleccionar materiales con mejor perfil nutricional y establecer criterios preliminares de seguridad antes de desarrollar ensayos agronómicos en suelo y cultivos

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La investigación se realizó en una finca productora de cacao y chocolate orgánico ubicada en el sector La Pastora, Tosagua, Manabí, Ecuador, situada en las coordenadas 0°49'40.7" S y 80°11'36.76" W. El lechuguín (*Eichhornia crassipes*) fue colectado en un reservorio privado de agua, mientras que la bovinaza se obtuvo del potrero de ganado de la misma finca.

Las muestras recolectadas fueron homogenizadas para obtener una matriz compuesta, siguiendo el criterio de García y Félix (2014). Por esta razón, las repeticiones empleadas en el estudio correspondieron a unidades experimentales de procesamiento y no a réplicas independientes de origen. Esta condición fue considerada como una limitación metodológica del estudio.

La bovinaza y el lechuguín fueron procesados por separado hasta su homogenización y, posteriormente, se utilizaron para la producción de abono orgánico.

Este material fue empleado luego en el proceso de vermicompostaje para la obtención de humus. Adicionalmente, se utilizó tierra de embanque como matriz de mezcla con el humus obtenido. La tierra de embanque fue definida como un sedimento local de textura franco arenosa, acumulado en áreas previamente inundadas de la finca.

Producción del abono orgánico

La producción del abono orgánico se realizó mediante la combinación volumétrica de bovinaza y lechuguín, con la finalidad de favorecer la biotransformación de residuos sólidos orgánicos, de acuerdo con lo señalado por Acosta-Durán. (2013). Se establecieron tres tratamientos según la relación bovinaza - lechuguín: T1 (1:1), T2 (2:1) y T3 (3:1). En todos los tratamientos se mantuvo constante el volumen de lechuguín en 0.12 m³, mientras que el volumen de bovinaza varió entre 0.12 y 0.36 m³.

Tabla 1. Tratamientos combinados de bovinaza y lechuguín.

Tratamiento	Relación bovinaza-lechuguín	Volumen de bovinaza (m ³)	Volumen de lechuguín (m ³)	Volumen total (m ³)
T1	1:1	0.12	0.12	0.24
T2	2:1	0.24	0.12	0.36
T3	3:1	0.36	0.12	0.48

Elaboración del humus mediante vermicompostaje

El abono orgánico obtenido en los tratamientos T1, T2 y T3 fue utilizado para la elaboración de humus mediante vermicompostaje. Para ello, se emplearon tres repeticiones por tratamiento, distribuidas en nueve cajas de madera de 60 × 50 × 20 cm. Antes de la incorporación de las lombrices, se registró el peso del abono orgánico colocado en cada unidad experimental.

Tabla 2. Peso inicial del abono orgánico empleado para la elaboración de humus.

Tratamiento	Repetición	Peso inicial (kg)	Promedio ± DE (kg)
T1	T1R1	25.80	24.33 ± 3.20
	T1R2	27.58	
	T1R3	19.62	
T2	T2R1	28.18	27.33 ± 1.20
	T2R2	26.96	
	T2R3	26.76	
T3	T3R1	16.70	15.82 ± 1.18
	T3R2	14.48	
	T3R3	16.28	

En cada unidad experimental se incorporaron 250 lombrices procedentes de una empresa de lombricultura. Las unidades fueron mantenidas durante siete meses, con mezclas periódicas del abono para favorecer la aireación y preservar la actividad de las lombrices (*Eisenia foetida*). Al finalizar el periodo de vermicompostaje, las lombrices fueron retiradas manualmente de cada lecho, y el humus obtenido fue colectado y almacenado en sacos. La humedad del material cosechado se mantuvo aproximadamente en 50%, según el procedimiento descrito por Corrales et al. (2024).

Aunque las unidades experimentales presentaron diferencias en la masa inicial del sustrato, los resultados químicos fueron expresados como concentración sobre base seca, a fin de permitir la comparación entre tratamientos.

Preparación de mezclas de humus con tierra de embanque

El humus obtenido fue empleado en un segundo ensayo orientado a caracterizar mezclas de humus (H) y tierra de embanque (TE). La tierra de embanque se utilizó como matriz de comparación debido a su baja materia orgánica y bajo contenido inicial de N, según el análisis preliminar.

Se evaluaron cinco tratamientos con cinco repeticiones. El tratamiento T1 correspondió al control con 100% tierra de embanque, mientras que el tratamiento T5 correspondió al control con 100%

humus. Los tratamientos T2, T3 y T4 estuvieron conformados por mezclas de tierra de embanque y humus en proporciones crecientes de humus.

Tabla 3. Tratamientos combinados de tierra de embanque y humus.

Tratamiento	Relación tierra de embanque:humus	Descripción
T1	100% TE	Control con tierra de embanque
T2	TE: H 1:1	Mezcla tierra de embanque y humus
T3	TE: H 1:2	Mezcla tierra de embanque y humus
T4	TE: H 1:3	Mezcla tierra de embanque y humus
T5	100% H	Control con humus

Análisis proximal y determinación de materia orgánica

El análisis proximal se realizó para caracterizar la composición de los materiales evaluados en términos de proteína, grasa, ceniza, fibra y carbohidratos. Los resultados fueron expresados en porcentaje y reportados sobre base seca.

La materia orgánica fue determinada mediante oxidación húmeda, basada en la cuantificación de la fracción orgánica oxidable de la muestra, de acuerdo con Izquierdo y Arévalo (2021). Los resultados de materia orgánica se expresaron en porcentaje, siguiendo lo reportado por Arévalo et al. (2023).

Determinación de macroelementos, microelementos y metales pesados

Los análisis químicos se realizaron sobre base seca. Los macroelementos y microelementos fueron determinados previa digestión ácida de las muestras. Se cuantificaron N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, B, Fe, Zn y Mn, de acuerdo con metodologías reportadas para análisis mineral en materiales orgánicos y suelos.

El Cd y Pb fueron determinados mediante espectroscopía de absorción atómica, tomando como referencia los procedimientos descritos por Ballinas et al. (2023) y Cheng et al. (2025). Los resultados fueron expresados en mg kg⁻¹. Para la determinación de metales pesados, se consideró la necesidad de

emplear curva de calibración, blanco analítico, límite de detección y material de referencia, cuando correspondiera.

Actividad de catalasa y ureasa

La actividad de catalasa y ureasa fue evaluada como indicador complementario de actividad biológica en el abono orgánico y el humus. Estos indicadores no fueron considerados por sí solos como criterio suficiente de calidad agronómica.

Para la prueba de catalasa, se colectaron 10 g de muestra por triplicado de los tratamientos T1, T2 y T3. Las muestras fueron colocadas en cilindros graduados de 50 mL y la reacción se inició mediante la adición de 10 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), seguido de una mezcla suave. La actividad de catalasa fue estimada a partir del volumen de O₂ liberado y expresada en mL min⁻¹, de acuerdo con Bécquer et al. (2017), Farinango et al. (2021) y Vélez et al. (2024).

Para la prueba cualitativa de ureasa, se colectaron 10 g de abono orgánico por triplicado en los tratamientos T1, T2 y T3. Como sustrato se utilizó 1 g de urea comercial. La actividad ureásica fue evaluada mediante el incremento del pH, asociado con la hidrólisis de la urea y la liberación de formas amoniacales, según lo descrito por Suástegui-Méndez (2017).

Análisis estadístico

Los datos fueron procesados con el software estadístico SAS® versión 9.0 para Windows. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey, considerando un nivel de significancia de $p \leq 0.05$.

Debido a que las muestras iniciales fueron homogenizadas para obtener una matriz compuesta, los resultados estadísticos deben interpretarse con cautela, ya que las repeticiones corresponden a unidades experimentales de procesamiento y no a réplicas independientes de origen. En consecuencia, el análisis estadístico se utilizó como herramienta de comparación interna entre tratamientos, sin extrapolar los resultados a condiciones externas no evaluadas

III. RESULTADOS

Composición proximal de la bovinaza y el lechuguín

El contenido de proteína fue de 14.75 % en la bovinaza y de 11.38 % en el lechuguín, sin diferencia significativa entre ambos materiales (Figura 1). La bovinaza presentó mayor contenido de ceniza, con 41.80 %, frente al 32.84 % registrado en *Eichhornia crassipes* ($p \leq 0.05$). Asimismo, el contenido de fibra fue mayor en la bovinaza, con 25.26 %, mientras que el lechuguín registró 19.42 %, con diferencia significativa entre ambos materiales ($p \leq 0.05$). Para el contenido de grasa no se observaron diferencias significativas.

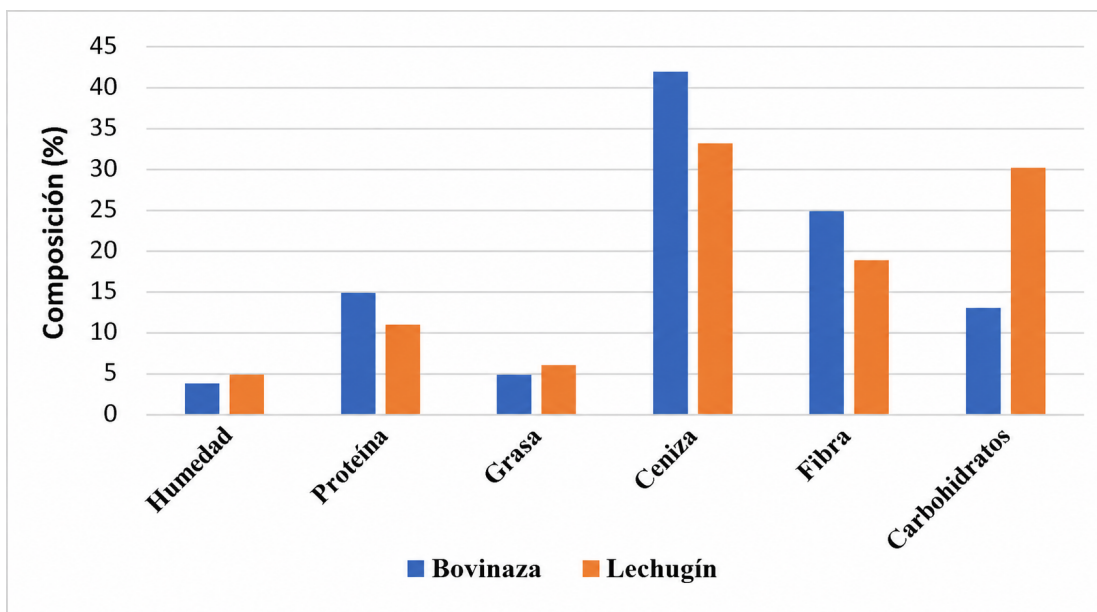


Figura 1. Composición proximal de proteína, grasa, ceniza, fibra y carbohidratos en bovinaza y lechuguín (%)

El lechuguín presentó 29.93 % de carbohidratos, valor superior al registrado en la bovinaza. En las mezclas de abono orgánico evaluadas, correspondientes a las proporciones bovinaza:lechuguín 1:1, 2:1 y 3:1, los valores proximales se mantuvieron próximos a la composición individual de las materias primas, sin evidenciar una tendencia proporcional clara asociada al incremento de bovinaza.

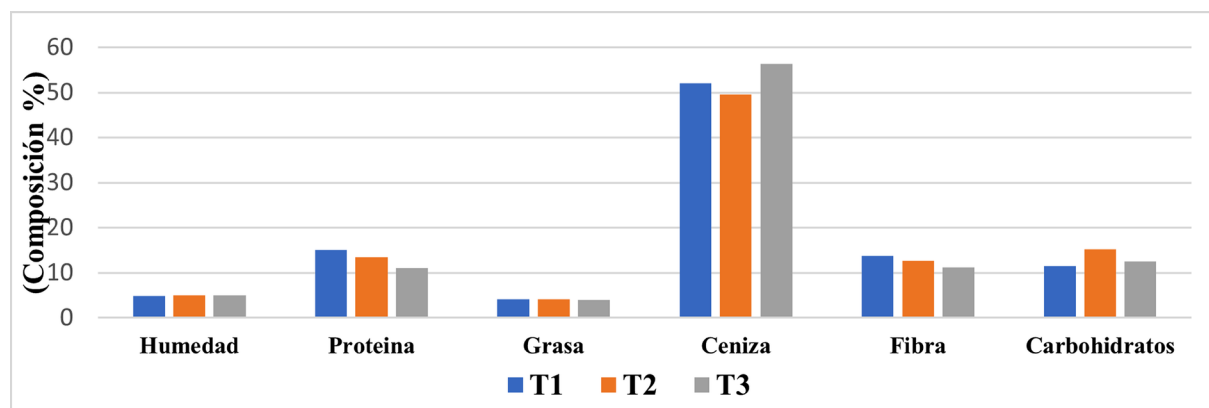


Figura 2. Composición proximal del abono orgánico según la proporción de bovinaza y lechuguín (%)

Composición proximal del abono orgánico según la proporción de bovinaza y lechuguín (%)

La bovinaza mostró valores descriptivamente superiores de N, P y K en comparación con el lechuguín. Sin embargo, estas diferencias deben interpretarse como no significativas. Los contenidos de Ca, Mg y S fueron similares entre ambos sustratos.

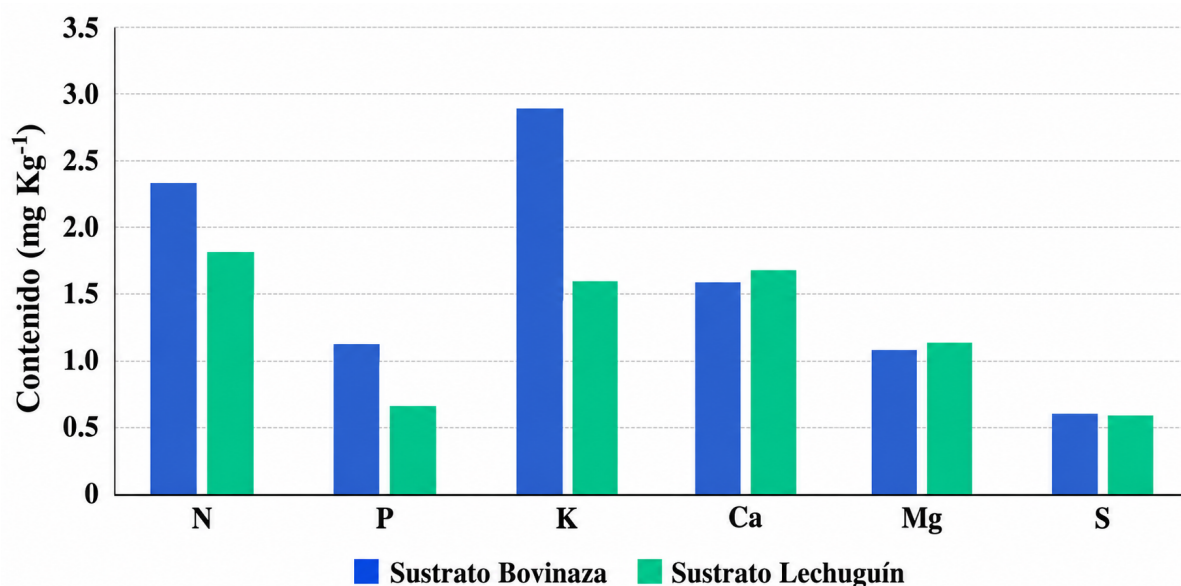


Figura 3. Contenido de N, P, K, Ca, Mg y S en bovinaza y lechuguín (mg kg⁻¹).

Contenido de Cu, B, Fe, Zn y Mn en bovinaza y lechuguín

Los contenidos de Cu, Fe y Zn fueron similares entre la bovinaza y el lechuguín. El lechuguín presentó valores descriptivamente superiores de B y Mn, con 78.05 y 798.25 mg kg⁻¹, respectivamente. No obstante, si el valor estadístico reportado corresponde a $p > 0.05$, estas diferencias no deben considerarse estadísticamente significativas.

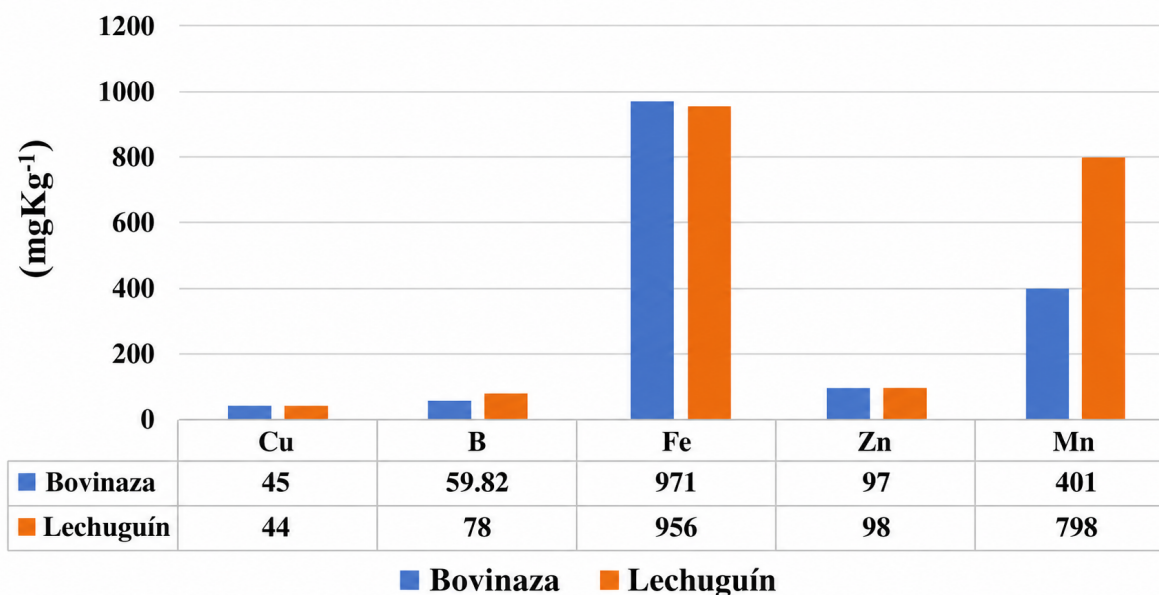


Figura 4. Contenido de Cu, B, Fe, Zn y Mn en bovinaza y lechuguín (mg kg⁻¹).

Contenido de Cd y Pb en bovinaza y lechuguín

El contenido de Cd fue de 0.56 mg kg⁻¹ en la bovinaza y de 0.16 mg kg⁻¹ en el lechuguín. Al considerar como referencia un límite de 0.50 mg kg⁻¹, el valor registrado en el lechuguín se ubicó por debajo de dicho umbral, mientras que el contenido de Cd en la bovinaza lo superó en 0.06 mg kg⁻¹.

Materia orgánica en lechuguín, bovinaza y abono orgánico

El lechuguín registró el mayor valor descriptivo de materia orgánica en comparación con la bovinaza y con el abono orgánico obtenido a partir de las mezclas bovinaza:lechuguín.

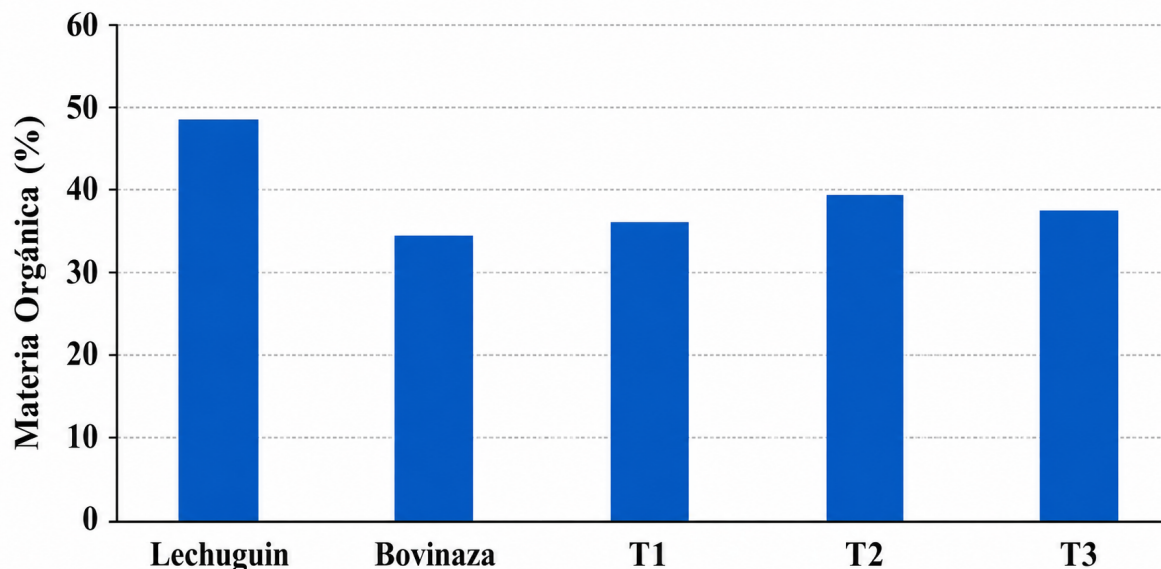


Figura 5. Contenido de materia orgánica en lechuguín, bovinaza y abono orgánico (%)

Actividad de ureasa (URE) y catalasa (CAT) en abono orgánico

La prueba cualitativa de ureasa evidenció incremento del pH de 7.00 a 9.50 en los tratamientos evaluados, lo que indica actividad ureásica bajo las condiciones del ensayo. Este comportamiento se asocia con la hidrólisis de la urea y la liberación de formas amoniacales.

Tabla 4. Prueba cualitativa de ureasa en abono orgánico.

Tratamiento	Relación bovinaza:lechuguín	pH inicial	pH final	Ureasa
T2R1	1: 1	7.0	9.5	++++
T2R3	2:1	7.0	9.5	++++
T1R3	3:1	7.0	9.5	++++

La actividad de catalasa mostró valores entre 12 y 22 mL O₂ min⁻¹. El mayor valor se observó en T2-R1, con 22 mL O₂ min⁻¹, seguido de T2-R3, con 21 mL O₂ min⁻¹. Los tratamientos T1-R2, T3-R2 y T3-R3 registraron valores entre 12 y 14 mL O₂ min⁻¹.

Tabla 5. Actividad de catalasa en abono orgánico.

Tratamiento	Actividad O ₂ (mL min ⁻¹)
T1-R2	12
T2-R1	22
T2-R3	21
T3-R2	14
T3-R3	12

Composición proximal del humus

En el humus obtenido se observaron valores similares de grasa, humedad, fibra, carbohidratos y proteína entre los tratamientos evaluados. Los tratamientos T2 y T3 presentaron mayores valores de ceniza respecto a los demás tratamientos.

Contenido de N, P y K en mezclas de tierra de embanque y humus

En las mezclas de tierra de embanque y humus, el tratamiento T5, correspondiente a 100 % humus, presentó los mayores valores descriptivos de N, P y K. El tratamiento T1, correspondiente a 100 % tierra de embanque, registró ausencia de N detectable, con 0.00 mg kg⁻¹. Asimismo, presentó 276.80 mg kg⁻¹ de P y 980.49 mg kg⁻¹ de K.

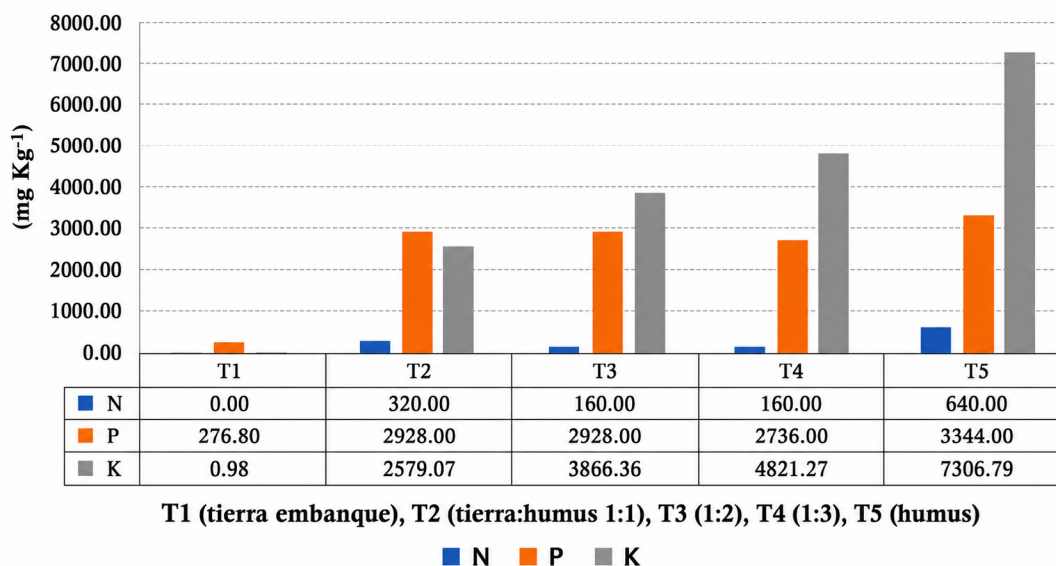


Figura 6. Contenido de N, P y K en mezclas de tierra de embanque y humus (mg kg⁻¹).

Contenido de Cd y Pb en tierra de embanque, humus y mezclas evaluadas

En el tratamiento correspondiente a 100 % tierra de embanque no se detectó Cd, con un valor de 0.00 mg kg⁻¹, mientras que el Pb se registró en 2.13 mg kg⁻¹. Estos resultados describen la concentración inicial de metales pesados en el sustrato control. Para sostener la afirmación sobre niveles permisibles de Cd y Pb en las mezclas con humus, el manuscrito debe incorporar los valores completos de estos metales en todos los tratamientos evaluados y especificar la norma utilizada como referencia.

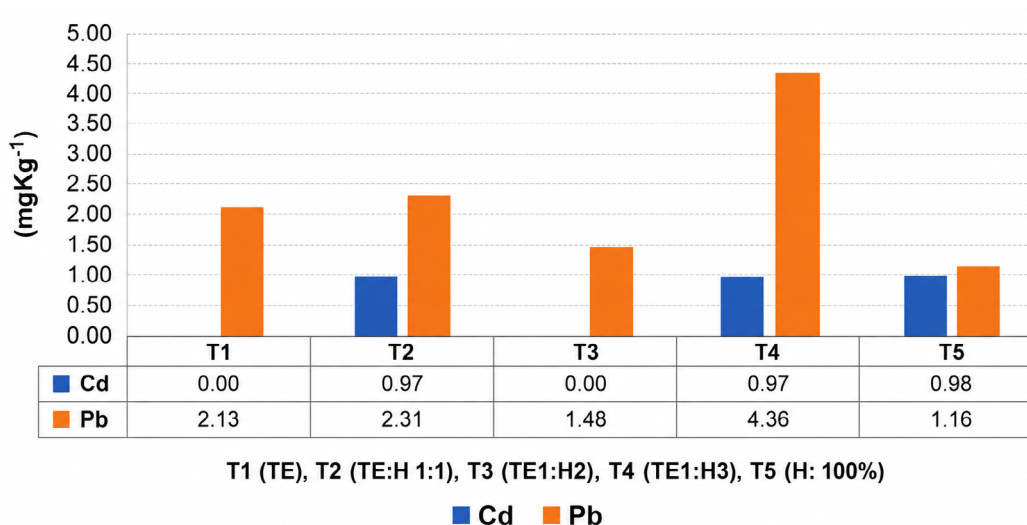


Figura 7. Contenido de Cd y Pb en humus (mg kg⁻¹)

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que la bovinaza y el lechuguín (*Eichhornia crassipes*) presentaron perfiles composicionales diferenciados, lo que respalda su uso combinado como materias primas para la obtención de abonos orgánicos y humus. La bovinaza registró mayores valores de ceniza, fibra y macronutrientes como N, P y K, mientras que el lechuguín presentó mayor contenido de carbohidratos y materia orgánica. Esta complementariedad resulta relevante porque los residuos de origen pecuario suelen aportar nutrientes minerales y fracciones orgánicas aprovechables, mientras que la biomasa vegetal acuática puede contribuir con carbono estructural, humedad, micronutrientes y compuestos orgánicos que favorecen los procesos de transformación biológica. En esa línea, Manzoor et al. (2024) señalan que el vermicompost puede actuar como fertilizante orgánico con potencial para mejorar la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica del sustrato, aunque su efecto depende de la naturaleza del residuo empleado, el proceso de estabilización y la dosis de aplicación.

La mayor presencia de ceniza, fibra, N, P y K en la bovinaza coincide con el papel reconocido de los residuos pecuarios como fuentes orgánicas de nutrientes. Sin embargo, cuando las diferencias se reportan con valores de $p > 0.05$, estas deben interpretarse como tendencias descriptivas y no como diferencias estadísticamente significativas. Esta precisión es importante porque evita sobredimensionar la capacidad nutricional del material evaluado. Las revisiones recientes sobre enmiendas orgánicas sostienen que estos materiales pueden mejorar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, pero sus efectos dependen de la composición del abono, el grado de madurez, la relación C:N, el pH, la conductividad eléctrica y las condiciones edáficas donde se apliquen. Por ello, los resultados del presente estudio deben entenderse como una caracterización inicial de los materiales y no como una demostración directa de mejora en fertilidad o productividad agrícola.

El comportamiento observado en el lechuguín también

es coherente con investigaciones recientes que destacan el potencial de *Eichhornia crassipes* como recurso orgánico para la elaboración de enmiendas, compost o biochar. Kassa et al. (2025) indican que el jacinto de agua posee una composición lignocelulósica que permite su valorización como material para mejorar atributos del suelo, especialmente cuando se transforma en productos estabilizados. Asimismo, Tibebe et al. (2025) reportaron que el compost elaborado a partir de jacinto de agua puede presentar potencial como enmienda sostenible, aunque recomiendan evaluar su composición mineral y la seguridad respecto a metales pesados antes de su aplicación agrícola. Esta advertencia es pertinente para el presente estudio, debido a que el lechuguín fue recolectado en un reservorio local y, por su origen acuático, puede acumular elementos presentes en el medio de procedencia.

En relación con el humus, el mayor valor descriptivo de N, P y K en el tratamiento correspondiente a 100% humus sugiere que el proceso de vermicompostaje permitió conservar o concentrar fracciones minerales de interés agrícola. Este comportamiento puede vincularse con la acción conjunta de lombrices y microorganismos, los cuales intervienen en la fragmentación del sustrato, la mineralización parcial de la materia orgánica y la transformación de nutrientes hacia formas más disponibles (Manzoor et al., 2024). No obstante, este resultado debe interpretarse con prudencia, porque una mayor concentración mineral no equivale necesariamente a mayor eficacia agronómica. Para confirmar su utilidad en campo sería necesario evaluar germinación, fitotoxicidad, estabilidad, madurez, conductividad eléctrica, relación C:N y respuesta vegetal bajo diferentes dosis de aplicación.

La actividad de ureasa y catalasa registrada en los abonos evaluados constituye un indicador complementario de actividad biológica durante el proceso de transformación orgánica. La ureasa se asocia con la hidrólisis de la urea y la generación de formas amoniacales, mientras que la catalasa se relaciona con procesos oxidativos y actividad microbiana aeróbica. En el presente estudio, el

incremento del pH de 7.00 a 9.50 en la prueba cualitativa de ureasa y los valores de catalasa entre 12 y 22 mL O₂ min⁻¹ evidencian actividad enzimática detectable en los materiales evaluados. Sin embargo, estos indicadores no deben considerarse por sí solos como prueba suficiente de calidad agronómica. Las enmiendas orgánicas pueden incrementar la actividad enzimática y modificar la diversidad microbiana del suelo, pero estas respuestas dependen del tipo de material aplicado, la estabilidad del abono, la humedad, el pH y las condiciones del suelo receptor. El contenido de Cd constituye uno de los aspectos más sensibles de la discusión, especialmente porque el estudio se contextualiza en una finca vinculada a la producción de cacao. En el manuscrito se reportó 0.56 mg kg⁻¹ de Cd en bovinaza y 0.16 mg kg⁻¹ en lechuguín. Si se adopta como referencia un límite de 0.50 mg kg⁻¹, la bovinaza superaría dicho umbral en 0.06 mg kg⁻¹. En sistemas cacaoteros, el cadmio representa un elemento crítico debido a su posible bioacumulación y transferencia hacia la cadena alimentaria. García Porras et al. (2025) señalan que el Cd en agroecosistemas de cacao constituye una preocupación para la inocuidad y sostenibilidad de la cadena productiva, por lo que resulta indispensable identificar sus fuentes, monitorear su disponibilidad y aplicar estrategias de mitigación cuando corresponda. La presencia de Pb en niveles bajos en la tierra de embanque y la ausencia de Cd detectable en ese mismo sustrato sugieren que este material puede funcionar como matriz de comparación dentro del ensayo. Esta precisión es indispensable porque *Eichhornia crassipes* puede acumular metales presentes en cuerpos de agua, mientras que los residuos pecuarios pueden contener elementos traza asociados con el suelo, la alimentación animal o el manejo productivo. En ese sentido, Tibebe et al. (2025) recomiendan evaluar simultáneamente el contenido nutricional y la seguridad por metales pesados en compost elaborado con jacinto de agua, especialmente cuando se propone su uso como enmienda agrícola. Finalmente, una limitación importante del estudio es que las muestras iniciales fueron homogenizadas para obtener una matriz compuesta; por tanto, las

repeticiones representan unidades de procesamiento y no réplicas independientes de origen. Esta condición reduce la fuerza inferencial del análisis estadístico y justifica que los resultados sean interpretados como una caracterización experimental inicial. Aun con esta limitación, el estudio aporta evidencia útil sobre la valorización de bovinaza y lechuguín para producir humus con presencia de nutrientes minerales y actividad enzimática. Para consolidar su aplicabilidad agrícola, futuras investigaciones deberían evaluar estabilidad del humus, relación C:N, pH, conductividad eléctrica, fitotoxicidad, dinámica de Cd y Pb, así como ensayos en suelo y cultivo de cacao bajo diferentes dosis de aplicación.

En conjunto, los resultados permiten sostener que la combinación de bovinaza y *Eichhornia crassipes* genera un material orgánico con composición mineral y actividad biológica de interés para su valoración como enmienda. Sin embargo, el alcance del estudio debe formularse con prudencia: los datos caracterizan el material, pero no demuestran todavía su eficacia agronómica ni su efecto sobre el rendimiento del cacao. Por tanto, el humus obtenido debe considerarse una alternativa potencial que requiere validación complementaria mediante análisis de estabilidad, fitotoxicidad, metales pesados y ensayos de respuesta vegetal.

V. CONCLUSIONES

La caracterización proximal, mineral y enzimática permitió identificar que la bovinaza y el lechuguín (*Eichhornia crassipes*) presentan perfiles diferenciados y complementarios para la elaboración de abono orgánico y humus. La bovinaza aportó mayor fracción mineral y macronutrientes, mientras que el lechuguín destacó por su aporte de materia orgánica y carbohidratos, lo que sustenta su integración como materias primas para procesos de biotransformación orgánica.

El humus obtenido mediante vermicompostaje con *Eisenia foetida* mostró el patrón más favorable en términos de concentración descriptiva de N, P y K, especialmente en el tratamiento compuesto por 100% humus en las mezclas con tierra de embanque. Este resultado sugiere que el humus constituye la

alternativa con mayor potencial nutricional dentro de los materiales evaluados; sin embargo, cuando los contrastes estadísticos correspondan a $p > 0.05$, los hallazgos deben interpretarse como tendencias y no como diferencias significativas.

La actividad de ureasa y catalasa evidenció actividad biológica en los materiales procesados, lo que refuerza el interés del abono orgánico y del humus como productos de transformación biológica. No obstante, estos indicadores son complementarios y no permiten, por sí solos, afirmar calidad agronómica definitiva ni eficacia en cultivos.

La presencia de Cd en bovinaza y la necesidad de completar la información sobre Pb evidencian una tensión relevante para el uso agrícola de estos materiales. Por ello, la valorización de bovinaza y lechuguín como enmiendas orgánicas debe incluir siempre el control de metales pesados y la verificación de criterios de inocuidad antes de cualquier recomendación de aplicación en suelo.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la combinación de bovinaza y *Eichhornia crassipes* es una alternativa viable para obtener humus con características composicionales y enzimáticas de interés. Su aporte principal radica en ofrecer una base inicial para seleccionar materiales orgánicos con potencial como enmienda; sin embargo, su aplicación agronómica requiere estudios adicionales de estabilidad, madurez, fitotoxicidad, relación C:N, conductividad eléctrica y respuesta en suelo o cultivo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización: E.D.M.A. y S.L.L.Q.; Metodología: E.D.M.A., A.N.C.M. y J.K.V.M.; Validación: S.L.L.Q. y M.Á.V.S.; Análisis formal: E.D.M.A., A.N.C.M. y M.Á.V.S.; Investigación: E.D.M.A., S.L.L.Q., A.N.C.M., J.K.V.M. y M.Á.V.S.; Recursos: S.L.L.Q. y M.Á.V.S.; Curación de datos: A.N.C.M. y J.K.V.M.; Redacción del borrador original: E.D.M.A., A.N.C.M. y J.K.V.M.; Redacción, revisión y edición: E.D.M.A., S.L.L.Q. y M.Á.V.S.; Visualización: A.N.C.M. y J.K.V.M.; Supervisión: S.L.L.Q. y M.Á.V.S.; Administración del proyecto: E.D.M.A.; Adquisición de fondos: E.D.M.A. y S.L.L.Q.

VI. REFERENCIAS

- Acosta-Durán, C. M., Solís-Pérez, O., Villegas-Torres, O. G., & Cardoso-Vigueros, L. (2013). Precomposteo de residuos orgánicos y su efecto en la dinámica poblacional de *Eisenia foetida*. *Agronomía Costarricense*, 37(1), 127–139.
- Arévalo G., Sánchez-Amaya J. y Guillen-Marquina, I. (2023). Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras. *Revista de Ciencias Ambientales*. 57(1), 1-13. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.11>
- Ballinas-Díaz E., Meza-Gordillo P., Aguilar-Nájera O., Vela-Gutiérrez G., Flores-Guillén L., Pérez-Jácome A. y Morales-Martínez, L. (2023). El análisis proximal, práctica e interpretación de resultados. *Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas*. pp 53. ISBN: 978-607-543-193-2
- Bécquer, C., Galdo, Y., Mirabal A., Quintana, M. y Puentes, A. (2017). Rizobios aislados de leguminosas forrajeras de un ecosistema ganadero árido de Holguín, Cuba. Tolerancia a estrés abiótico y producción de catalasa (Fase II). *Cuban Journal of Agricultural Science*, 51(1), 117-127.
- Canning, A., Chowdhury, S. P., & Bending, G. D. (2025). A review on harnessing the invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for use as an agricultural soil amendment. *Land*, 14(5), 1116. doi:10.3390/land14051116
- Cheng S.; Liao, J.; Jia, F. y Wen, Y. (2025). Characterization of Cd and Pb Bioavailability in Agricultural Soils Using DGT Technique and DIFS Model. *Minerals*, 15: 386. <https://doi.org/10.3390/min15040386>
- Corrales Sillo, E., Luna Murillo, R. A., Carrión Benavides, C. D., Quinatoa Lozada, E. F. y Espinoza coronel, A. L. (2024). Comparación de producción de compost con diferentes formulaciones de residuos de origen vegetal y pecuario. *Ciencia y Tecnología*, 17(2), 64–72. <https://doi.org/10.18779/cyt.v17i2.803>
- Farinango, E., Jácome, C., Llanos, F., Lasso, A. y

- Ramos, J. (2021). Usos de la enzima catalasa en la reducción del peróxido de hidrógeno y sus aplicaciones industriales. *Journal of Agro-Industry Sciences*, 3(2), 45-50.
- García Gutiérrez, C., & Félix Herrán, J. A. (2014). *Manual para la producción de abonos orgánicos y biorracionales*. Fundación Produce Sinaloa, A. C.
- García Porras, G. A., et al. (2025). Addressing cadmium in cacao farmland: A path to safer, sustainable chocolate. *Agriculture*, 15(4), 433. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040433>
- Gezahegn, A., Selassie, Y. G., Agegnehu, G., Addisu, S., Mihretie, F. A., Kohira, Y., Lewoyehu, M., & Sato, S. (2024). Sustainable weed management and soil enrichment with water hyacinth composting and mineral fertilizer integration. *Environmental Challenges*, 16, 101007. doi:10.1016/j.envc.2024.101007
- Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, J. J. (2021). Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación. *Revista Ingeniería y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Kassa, Y., Amare, A., Nega, T., Chala, B., Freyer, B., Waldmann, B., Fentie, T., Mulu, T., Adgo, T., Ayalew, G., Adugna, M., & Tibebe, D. (2025). Water hyacinth conversion to biochar for soil nutrient enhancement in improving agricultural product. *Scientific Reports*, 15, 1820. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84729-x>
- Manzoor, A., Naveed, M. S., Ali, R. M. A., Naseer, M. A., Ul-Hussan, M., Saqib, M., Hussain, S., & Farooq, M. (2024). Vermicompost: A potential organic fertilizer for sustainable vegetable cultivation. *Scientia Horticulturae*, 336, 113443. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113443>
- Qi, J., Yang, H., Wang, X., Zhu, H., Wang, Z., Zhao, C., Li, B., & Liu, Z. (2023). State-of-the-art on animal manure pollution control and resource utilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110462. doi:10.1016/j.jece.2023.110462
- Suástegui-Méndez, E., Cruz-Flores G. y Angeles-Cervantes, E. (2017). Hidrólisis de N-orgánico y liberación de NH_4^+ mediante actividad ureasa en suelos forestales de áreas naturales protegidas. Pp12 https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/Ureasa_en_Suelos_Forestales-de-ANPs.pdf
- Tibebe, D., Kassa, Y., Biru, B., Aregahagne, S., Jember, K., Fentie, T., Assefa, F., Moges, Z., & Ayele, H. S. (2025). Evaluating the nutrient content and heavy metal safety of water hyacinth-based compost: A sustainable solution for chemical fertilizer reduction and nutrient recycling in agriculture. *Scientific African*, 30, e02985. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02985>
- Vélez, A., Vera, M. y Martínez, D. (2024). Métodos para determinar la actividad enzimática en suelos contaminados. *South Sustainability*, 5(1): 1-12. DOI: 10.21142/SS-0501-2024-e092
- Xu, J., Li, Y., & Li, L. (2025). A comprehensive review of the effects of organic amendments on soil health and fertility: Mechanisms, greenhouse gas emissions, and implications for sustainable agriculture. *Agronomy*, 15(12), 2705. <https://doi.org/10.3390/agronomy15122705>
- Xu, J., Li, Y., & Li, L. (2025). A comprehensive review of the effects of organic amendments on soil health and fertility: Mechanisms, greenhouse gas emissions, and implications for sustainable agriculture. *Agronomy*, 15(12), 2705. doi:10.3390/agronomy15122705