

Revalorización de la borra de café mediante lombricompostaje con *Eisenia fetida*: una revisión documental

G.H.Niño Mendoza¹

¹ Universidad Tecnológica de San Miguel de Allende, Dirección de Ingenierías, Camino a San Julián No.8 Col, Casco de Landeta, 37700 San Miguel de Allende, Gto, México, ghnino@utsma.edu.mx

Resumen

La producción de café genera grandes cantidades de residuos sólidos orgánicos, particularmente pulpa, cascara y borra de café, los cuales representan un problema ambiental debido a su alto contenido de materia orgánica, cafeína y compuestos fenólicos. En este contexto, el vermicompostaje mediante el uso de la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*) se considera una alternativa sustentable para el aprovechamiento de estos residuos agroindustriales. El presente trabajo realiza una revisión documental de literatura científica relacionada con el vermicompostaje de residuos derivados del café, con el objetivo de analizar la eficiencia del proceso, las principales variables fisicoquímicas involucradas y los beneficios agronómicos y ambientales reportados. La metodología se desarrolla bajo un enfoque documental cualitativo mediante el análisis comparativo de artículos científicos, tesis y documentos técnicos obtenidos de bases de datos académicas especializadas. Los resultados muestran que *Eisenia fetida* posee una elevada capacidad para degradar materia orgánica compleja, favoreciendo la estabilización biológica del material, la reducción de la relación carbono/nitrógeno y el incremento en la disponibilidad de nutrientes esenciales. Asimismo, se identificó que factores como humedad, aireación, temperatura y proporciones de mezcla influyen directamente en la eficiencia del vermicompostaje y en la calidad del humus obtenido. Diversos estudios también reportan mejoras en propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo tras la aplicación del vermicompostaje. Se concluye que el vermicompostaje de residuos derivados del café constituye una estrategia eficiente y sustentable para el manejo de residuos agroindustriales, contribuyendo a la reducción de contaminación ambiental y promoviendo prácticas de economía circular y agricultura sostenible.

Palabras clave— Borra de café, vermicompostaje, *Eisenia fetida*, lombricomposta, residuos agroindustriales, economía circular, sostenibilidad agrícola.

Revaluation of Spent Coffee Grounds through Vermicomposting with *Eisenia fetida*: A Documentary Review

Abstract

Coffee production generates large amounts of organic solid waste, particularly coffee pulp, husk, and spent coffee grounds, which represent an environmental problem due to their high content of organic matter, caffeine, and phenolic compounds. In this context, vermicomposting using the California red worm (*Eisenia fetida*) is considered a sustainable alternative for the utilization of these agro-industrial residues. The present study provides a documentary review of scientific literature related to the vermicomposting of coffee-derived residues, aiming to analyze process efficiency, the main physicochemical variables involved, and the agronomic and environmental benefits reported in previous studies. The methodology was developed under a qualitative documentary approach through the comparative analysis of scientific articles, theses, and technical documents obtained from specialized academic databases. The results show that *Eisenia fetida* has a high capacity to degrade complex organic matter, promoting biological stabilization of the material, reduction of the carbon/nitrogen ratio, and increased availability of essential nutrients. Likewise, factors such as moisture, aeration, temperature, and mixing proportions directly influence vermicomposting efficiency and the quality of the obtained humus. Several studies also report improvements in the physical, chemical, and microbiological properties of soils after vermicompost application. It is concluded that vermicomposting of coffee-derived residues constitutes an efficient and sustainable strategy for agro-industrial waste management, contributing to the reduction of environmental pollution and promoting circular economy practices and sustainable agriculture.

Keywords— Spent coffee grounds, vermicomposting, *Eisenia fetida*, vermicompost, agro-industrial waste, circular economy, sustainable agriculture.

I. INTRODUCCIÓN

El café constituye una de las materias primas agrícolas de mayor importancia en el comercio internacional y una de las bebidas más consumidas a nivel mundial [1–3]. Su producción global supera los 10 millones de toneladas anuales [4,5], generando durante su procesamiento una gran cantidad de

residuos sólidos orgánicos, entre los que destacan pulpa, cascara y borra de café. Se estima que la agroindustria cafetalera produce aproximadamente 7 millones de toneladas de residuos orgánicos cada año [4], lo que representa un problema ambiental significativo debido a la disposición inadecuada de estos subproductos [6].

Recibido: 10 de diciembre de 2025

Aceptado: 3 de junio de 2026

Publicado: 15 de junio de 2026

Diversos estudios reportan que los residuos derivados del café presentan elevadas concentraciones de materia orgánica, humedad, cafeína y compuestos fenólicos, los cuales pueden provocar contaminación de cuerpos de agua, degradación del suelo y alteraciones en los ecosistemas [6-8]. Asimismo, durante su descomposición anaerobia se generan emisiones de metano, uno de los principales gases de efecto invernadero asociados con el cambio climático [8]. Desde el punto de vista químico, estos residuos contienen lignina, lípidos, celulosa, hemicelulosa y otros polisacáridos complejos [7], además de compuestos bioactivos como aminoácidos, ácidos grasos, polifenoles y minerales con potencial de aprovechamiento industrial y agrícola [9].

La problemática ambiental asociada con la acumulación de residuos cafetaleros ha impulsado el desarrollo de estrategias sostenibles orientadas a su valorización y aprovechamiento [4,7,10]. En este contexto, diversas investigaciones han propuesto alternativas relacionadas con la producción de biocombustibles, biochar, fertilizantes orgánicos, materiales compuestos, alimentación animal y sustratos para el crecimiento de hongos [7,9-11]. Estas estrategias buscan fortalecer modelos de economía circular mediante el reciclaje y reutilización de residuos agroindustriales, promoviendo prácticas de sostenibilidad ambiental y reducción de impactos contaminantes [7,10,12].

Entre las tecnologías biológicas empleadas para el aprovechamiento de residuos orgánicos, el vermicompostaje destaca como una alternativa sustentable y eficiente para transformar residuos sólidos en productos estabilizados y ricos en nutrientes [13,14]. Este proceso utiliza lombrices epigeas, particularmente *Eisenia fetida*, conocida comúnmente como lombriz roja californiana, para acelerar la degradación biológica de la materia orgánica y producir humus de alta calidad [13,14]. Diversos estudios señalan que el vermicompostaje mejora significativamente la estructura física del suelo e incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales [15,16], al mismo tiempo que favorece la actividad microbiológica y los procesos de humificación mediante la acción de sustancias bioactivas [17,18]. Asimismo, esta biotecnología contribuye directamente a la reducción de la contaminación ambiental y al fortalecimiento de modelos de economía circular dentro de sistemas agrícolas sostenibles [19,20].

En la última década, la borra y otros residuos sólidos orgánicos derivados del café han adquirido relevancia como posibles enmiendas orgánicas debido a su composición química y contenido nutrimental [6,21,22]. Se han reportado aplicaciones en céspedes, jardines y cultivos agrícolas, observándose mejoras en retención de humedad, estructura del suelo y actividad microbiológica [6,22]. Asimismo, se ha señalado que los residuos de café constituyen una importante fuente de nutrientes cuando se mezclan con otros materiales orgánicos, presentando una relación carbono-nitrógeno cercana a 20:1 [23].

El contenido químico y nutrimental de los residuos sólidos orgánicos derivados del café evidencia concentraciones importantes de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio,

además de micronutrientes esenciales como hierro, zinc, manganeso y cobre, como se muestra en la Tabla I [6, 21-24]. Estas características demuestran el potencial de los residuos cafetaleros para su aprovechamiento en procesos de vermicompostaje y producción de fertilizantes orgánicos.

TABLA I.
PROPIEDADES Y ELEMENTOS QUÍMICOS PERTINENTES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL CAFÉ

Propiedades químicas	Rango contenido
Conductividad eléctrica	3.19 dS/m ⁻¹
pH	5.91
Materia orgánica	78.4 %
Contenido químico	Rango contenido
Nitrógeno (N)	2.24 %
Fósforo (P)	0.15 %
Potasio (K)	0.47 %
Calcio (Ca ²⁺)	1.00 %
Magnesio (Mg ²⁺)	0.20 %
Sodio (Na ⁺)	0.10 %
Hierro (Fe)	70.6 ppm
Zinc (Zn)	11.9 ppm
Manganeso (Mn)	24.5 ppm
Cobre (Cu)	22.2 ppm

A pesar del creciente interés por el aprovechamiento de residuos derivados del café, la literatura científica presenta diferencias metodológicas importantes respecto a las proporciones de mezcla, tiempos de estabilización, condiciones de humedad y eficiencia del vermicompostaje [8,13,25-28]. Algunos estudios reportan elevada eficiencia biológica y rápida estabilización del material, así como una reducción significativa de la relación carbono/nitrógeno y una mejora en la disponibilidad de nutrientes durante el proceso [25-28], mientras otros señalan limitaciones relacionadas con altas concentraciones de cafeína y compuestos fenólicos que pueden afectar la actividad biológica de *Eisenia fetida* [8,21,22,29,30]. Asimismo, persiste información limitada respecto al escalamiento industrial, la viabilidad económica y la evaluación de largo plazo del impacto agronómico y ambiental del vermicompost derivado de residuos cafetaleros [10,12,31,32].

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar y sintetizar la literatura científica relacionada con el vermicompostaje de la borra de café, haciendo énfasis en la eficiencia del proceso de transformación mediante el uso de la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*), así como en los principales factores físicos, químicos y biológicos que influyen en su desarrollo. Asimismo, se busca evaluar los beneficios ambientales, agronómicos y económicos derivados de la reutilización de este residuo orgánico, destacando su potencial para la producción de abonos orgánicos de alta calidad y el manejo sostenible de residuos agroindustriales.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque documental cualitativo de tipo descriptivo-analítico, orientado al análisis de información científica relacionada con el uso de la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*) en procesos de vermicompostaje de residuos orgánicos derivados del café, particularmente pulpa, cascarilla y borra de café. Este enfoque permite recopilar, organizar, comparar y analizar críticamente

la evidencia científica disponible respecto a los procesos de transformación biológica de residuos cafetaleros, así como los efectos agronómicos, ambientales y económicos asociados con el vermicompostaje.

La investigación se plantea desde una perspectiva de revisión crítica de literatura científica especializada, debido a que el vermicompostaje de residuos de café representa una alternativa relevante dentro de modelos de economía circular y manejo sustentable de residuos agroindustriales [4, 13, 23, 31].

Asimismo, el análisis se orienta a identificar tendencias de investigación, limitaciones metodológicas, condiciones operativas y principales aportaciones científicas relacionadas con el aprovechamiento de residuos cafetaleros mediante *Eisenia fetida*.

La recopilación de información se realiza mediante una búsqueda sistemática de literatura científica publicada entre 1995 y 2025. Para ello, se consultan bases de datos académicas y motores especializados ampliamente utilizados en investigación científica, entre ellos SciELO, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Redalyc y Google Scholar, además de repositorios universitarios digitales, tesis de posgrado y documentos técnicos relacionados con manejo de residuos orgánicos, producción cafetalera y agricultura sustentable.

La búsqueda bibliográfica se desarrolla utilizando palabras clave en español e inglés relacionadas directamente con el objeto de estudio. Entre los principales términos empleados se incluyen: “vermicompostaje”, “lombricomposta”, “*Eisenia fetida*”, “lombriz roja californiana”, “coffee waste”, “spent coffee grounds”, “coffee pulp”, “coffee husk”, “organic waste”, “vermicomposting”, “composting”, “biofertilizers” y “circular economy”

Los documentos recuperados son sometidos a un proceso de selección considerando criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Se incluyen artículos científicos indexados, tesis de posgrado, libros especializados y documentos técnicos relacionados directamente con:

- Vermicompostaje de residuos orgánicos;
- Uso de *Eisenia fetida*;
- Aprovechamiento de residuos derivados del café;
- Producción de abonos orgánicos;
- Sostenibilidad agrícola y economía circular.

Se priorizan investigaciones que reportan información experimental relacionada con:

- Tiempos de degradación;
- Relación carbono/nitrógeno;
- Estabilidad biológica;
- Crecimiento y supervivencia de lombrices;
- Calidad fisicoquímica del vermicompostaje;
- Efectos agronómicos y ambientales.

Por otra parte, se excluyen documentos sin respaldo científico, publicaciones duplicadas, estudios con información metodológica insuficiente y referencias no relacionadas directamente con el objeto de estudio.

Posteriormente, los estudios seleccionados se organizan y clasifican de acuerdo con:

1. Tipo de residuo utilizado;
2. Condiciones de vermicompostaje;
3. Metodología experimental;
4. Indicadores fisicoquímicos evaluados;
5. Resultados agronómicos y ambientales reportados.

Esta clasificación permite comparar tendencias, similitudes y diferencias metodológicas entre investigaciones nacionales e internacionales.

El análisis de información se realiza mediante revisión comparativa y síntesis crítica de los estudios seleccionados. Se identifican coincidencias y discrepancias entre investigaciones respecto a eficiencia del vermicompostaje, velocidad de degradación, adaptación de *Eisenia fetida*, calidad del vermicompostaje obtenido y limitaciones técnicas reportadas. Asimismo, se analizan variables experimentales como humedad, temperatura, aireación, proporción de mezcla, tiempo de estabilización, densidad poblacional de lombrices y composición química de los residuos, debido a que diversos estudios señalan que estos factores influyen directamente en la eficiencia del proceso y en la calidad final del vermicompostaje [8,25,28,33-35].

De igual manera, se incorporan investigaciones relacionadas con sostenibilidad ambiental, análisis de ciclo de vida y valorización integral de residuos cafetaleros [4,12,31], permitiendo ampliar el análisis hacia enfoques de economía circular y aprovechamiento sustentable de residuos agroindustriales. Este procedimiento metodológico facilita una evaluación integral sobre las ventajas, limitaciones y perspectivas del vermicompostaje de residuos de café utilizando *Eisenia fetida*.

La metodología utilizada permite integrar información científica actual y especializada sobre el vermicompostaje de residuos de café; sin embargo, también evidencia algunas limitaciones importantes. Una parte considerable de los estudios disponibles corresponde a investigaciones desarrolladas a escala laboratorio, lo que dificulta extrapolar los resultados a sistemas productivos comerciales o industriales [25, 28]. Asimismo, existe heterogeneidad metodológica entre investigaciones, especialmente en proporciones de mezcla, tiempos de estabilización y parámetros de evaluación, lo que limita la comparación directa de resultados.

III. RESULTADOS

A. Caracterización de los residuos de café y su potencial de aprovechamiento

Los residuos derivados de la agroindustria cafetalera, particularmente la pulpa, cáscara y borra de café, han adquirido relevancia como sustratos potenciales para procesos de compostaje y vermicompostaje debido a su elevada disponibilidad y contenido de materia orgánica [3,21,22,23,36-38]. Diversas investigaciones coinciden en que estos residuos contienen cantidades importantes de carbono orgánico, nitrógeno, potasio, compuestos fenólicos y materiales

lignocelulósicos, lo que favorece su aprovechamiento en procesos de reciclaje de nutrientes y producción de biofertilizantes [22,23,36–39]. Sin embargo, varios estudios advierten que el uso directo de residuos de café puede generar efectos fitotóxicos y procesos de acidificación debido a la presencia de cafeína, taninos y compuestos fenólicos [21,22,29,36]. Estas observaciones son consistentes con investigaciones recientes que reportan disminución en germinación y crecimiento vegetal cuando la borra de café se aplica sin estabilización biológica previa [21,29,36].

Aunque la mayoría de los estudios destacan el potencial agronómico de los residuos cafetaleros, existen diferencias importantes respecto a la composición química reportada entre investigaciones [23,37-39]. Algunos autores atribuyen estas variaciones a factores intrínsecos y operacionales como el tipo de café procesado, las condiciones específicas de tostado, el método de extracción empleado y el posterior almacenamiento del residuo [37-40]. Esta heterogeneidad dificulta establecer parámetros estandarizados para su utilización agrícola directa, lo que evidencia la necesidad de desarrollar protocolos específicos para su caracterización fisicoquímica antes de su aprovechamiento en procesos de vermicompostaje [21,37-39].

Además de su potencial agrícola, investigaciones recientes han destacado el valor de los residuos de café en estrategias de economía circular y valorización de subproductos agroindustriales [4,5,12,31]. Algunos estudios reportan aplicaciones en producción de biocombustibles, biochar, materiales compuestos y acondicionadores de suelo [2,7,9-11], lo que demuestra la versatilidad de estos residuos y su importancia dentro de modelos de producción sustentable. No obstante, la literatura señala que muchas de estas aplicaciones aún se encuentran en fases experimentales o de laboratorio, existiendo escasa información sobre su viabilidad económica y escalamiento industrial [10-12,38].

B. Vermicompostaje de residuos de café mediante *Eisenia fetida*

Las investigaciones pioneras sobre vermicompostaje de pulpa de café demostraron que *Eisenia fetida* posee una elevada capacidad para transformar residuos orgánicos complejos en productos estables y ricos en nutrientes [28,41,42].

Estudios desarrollados en Costa Rica identificaron que variables operativas como la humedad, la temperatura, la aireación y la densidad poblacional de lombrices influyen directamente en la velocidad de degradación y en la calidad del vermicompost obtenido [31,32, 33]. Estos resultados coinciden con investigaciones posteriores que señalan que el control riguroso de parámetros fisicoquímicos es fundamental para evitar condiciones anaerobias [21, 34] y minimizar las pérdidas de nitrógeno por volatilización durante el proceso [26, 35]

Se ha observado que el vermicompostaje de pulpa de café reduce significativamente la relación carbono/nitrógeno (C/N), incrementa la disponibilidad de fósforo y nitrógeno y mejora la estabilidad del material orgánico [28]. Asimismo, diversos estudios reportan que el vermicompostaje presenta mayor eficiencia biológica que el compostaje convencional debido a la interacción entre microorganismos y lombrices [25,26,35,43].

Sin embargo, algunos trabajos reportan tiempos de estabilización variables dependiendo de las características del residuo utilizado y de las condiciones experimentales [8,13,25,26]. Mientras ciertas investigaciones muestran procesos de degradación relativamente rápidos y elevada mineralización [25,28], otros estudios señalan limitaciones relacionadas con altas concentraciones de compuestos fenólicos y cafeína [26,29,40].

El análisis comparativo de investigaciones recientes evidencia discrepancias importantes respecto a las proporciones óptimas de mezcla utilizadas en el vermicompostaje de residuos de café [8,13,25,26]. Algunos autores recomiendan mezclar borra de café con residuos lignocelulósicos o estiércoles para mejorar aireación y equilibrio carbono/nitrógeno [8,25,26], mientras que otros reportan que concentraciones elevadas de residuos cafetaleros pueden afectar la supervivencia y reproducción de las lombrices [13,26,29]. Estas diferencias metodológicas dificultan establecer condiciones universales de operación y ponen de manifiesto la necesidad de estandarizar parámetros experimentales para mejorar la reproducibilidad de resultados [21, 44, 45]

C. Papel biológico de *Eisenia fetida* en la degradación de residuos de café

Diversos estudios han demostrado que la actividad biológica de *Eisenia fetida* —especialmente su tasa de reproducción, ganancia de biomasa y estimulación de la microbiota intestinal— constituye uno de los factores clave en la eficiencia y aceleración del vermicompostaje [22, 34, 43, 44]. Se ha identificado que las enzimas intestinales de esta especie participan activamente en la degradación de lignina, hemicelulosa y celulosa presentes en los residuos de café, favoreciendo la transformación de compuestos complejos y la mineralización de nutrientes [45, 46]. Asimismo, se ha reportado que la actividad microbiana y la producción de ácidos húmicos incrementan significativamente durante el vermicompostaje [12, 17], favoreciendo de manera directa la disponibilidad nutrimental en el sustrato y el consecuente crecimiento vegetal [17, 34, 44]

Otros estudios indican que las lombrices actúan como modificadores biológicos del sustrato al estimular comunidades microbianas benéficas y acelerar procesos de humificación [43,45,46,47]. Sin embargo, algunos autores señalan que la eficiencia biológica de *Eisenia fetida* puede disminuir cuando predominan residuos con elevada acidez o alto contenido fenólico [8,26,29]. De igual manera, se ha observado que la supervivencia y reproducción de las lombrices depende significativamente de la humedad, temperatura y aireación del sistema [34,45].

Aunque la mayoría de las investigaciones reportan resultados positivos, existen diferencias importantes en la capacidad adaptativa de *Eisenia fetida* dependiendo del tipo de residuo utilizado [25,34,45,46]. Algunos estudios muestran alta tolerancia a mezclas con borra de café [8,25], mientras otros reportan disminución en actividad biológica cuando las proporciones de residuos cafetaleros son excesivas [18,29]. Estas discrepancias reflejan la necesidad de realizar

investigaciones más homogéneas que permitan definir límites adecuados de incorporación de residuos de café dentro de sistemas de vermicompostaje.

D. Comparación entre compostaje y vermicompostaje de residuos de café

El análisis comparativo de investigaciones recientes evidencia resultados contrastantes respecto al uso de compostaje y vermicompostaje como estrategias de estabilización de residuos cafetaleros. Por un lado, algunos estudios destacan que el compostaje convencional es altamente eficiente en la degradación inicial de compuestos térmicamente sensibles y volúmenes masivos [25, 43]. Por otro lado, evaluaciones térmicas y bioquímicas posteriores demuestran que el vermicompostaje logra una mayor madurez química, estabilidad de nutrientes y reducción de fitotoxicidad en menores tiempos de operación [26, 48, 49]. Diversos estudios coinciden en que el vermicompostaje presenta ventajas relacionadas con mayor velocidad de degradación, reducción del volumen de residuos y obtención de biofertilizantes con mayor disponibilidad nutrimental [12,25,26,31,38,41,42]. Asimismo, se reporta que la acción conjunta de microorganismos y lombrices favorece procesos de humificación más eficientes en comparación con el compostaje convencional [12, 17].

No obstante, algunos autores señalan que el compostaje convencional puede resultar más eficiente en sistemas diseñados para gestionar grandes volúmenes de residuos o bajo condiciones ambientales extremas que limitarían el desarrollo biológico de las lombrices [25, 34, 35].

Además, ciertas investigaciones reportan que el vermicompostaje requiere un monitoreo y control más estricto de la humedad, la temperatura y la aireación para evitar episodios de mortalidad masiva en las poblaciones de *Eisenia fetida* [21, 31, 34]. Estas observaciones indican que la elección entre compostaje y vermicompostaje depende no solamente de la calidad final del producto, sino también de factores operativos, económicos y ambientales.

En contraste, diversos estudios concluyen que la mezcla de borra de café con materiales ricos en fibra o residuos lignocelulósicos mejora significativamente la estabilidad biológica y acelera la transformación del material [8,13, 25,26,34]. Además, se ha reportado que el vermicompostaje favorece la formación de sustancias húmicas y mejora la actividad microbiológica del sustrato, incrementando con ello la calidad agronómica del producto obtenido [17,49,50].

E. Impacto agronómico y ambiental del vermicompostaje

Diversos estudios destacan que el vermicompost generado a partir de residuos de café mejora significativamente las propiedades del suelo. Específicamente, su aplicación incrementa la porosidad y la capacidad de retención de agua (propiedades físicas) [15, 16], eleva la disponibilidad de macronutrientes esenciales y la capacidad de intercambio catiónico (propiedades químicas) [6, 15], y estimula la actividad enzimática junto con la diversidad de la microbiota

benéfica (propiedades biológicas) [48,49]. Se han reportado incrementos significativos en el crecimiento vegetal y el rendimiento agrícola tras la aplicación de este abono orgánico [15, 17]. Asimismo, su incorporación en la matriz edáfica mejora la retención de humedad debido al aporte de materia orgánica estructural [15,16] y estimula de forma directa la actividad microbiana benéfica del suelo [17, 49]. Asimismo, algunos estudios señalan que la presencia de ácidos húmicos y compuestos bioactivos derivados del proceso de vermicompostaje favorece la disponibilidad de nutrientes y mejora la fertilidad del suelo [17,50].

Desde el punto de vista ambiental, los estudios recientes muestran una tendencia creciente hacia la evaluación del vermicompostaje dentro de modelos de economía circular y manejo sustentable de residuos de la industria cafetalera [4,5, 12, 25, 31]. Esta transición hacia tecnologías de residuo cero no solo optimiza la recuperación de nutrientes a nivel local, sino que mitiga significativamente la huella de carbono y el impacto ambiental asociado a la disposición en vertederos [12,51,52]. Asimismo, la integración de estos abonos estables en planes macroeconómicos de gestión de biorresiduos demuestra su viabilidad tanto en el análisis de ciclo de vida (ACV) como en la sostenibilidad de los agroecosistemas a largo plazo [4,5,12,52]. Se ha señalado que la valorización integral de residuos cafetaleros permite reducir impactos ambientales asociados con disposición inadecuada, emisiones contaminantes y acumulación de residuos orgánicos [4,12,52]. Sin embargo, algunos autores advierten que todavía existe información limitada relacionada con análisis económicos integrales, escalamiento industrial y evaluación de largo plazo del impacto agronómico del vermicompostaje derivado de residuos de café [10,12,38]. Investigaciones basadas en análisis de ciclo de vida reportan que el aprovechamiento de borra de café mediante vermicompostaje puede disminuir significativamente la carga ambiental en comparación con métodos convencionales de disposición final [12, 52]. Asimismo, diversos estudios indican que el vermicompost derivado de residuos de café posee potencial como fertilizante orgánico y sustrato agrícola dentro de sistemas productivos sostenibles [51-53].

Aunque la mayoría de las investigaciones reportan beneficios agronómicos importantes en el rendimiento y desarrollo de los cultivos, así como mejoras en la calidad del vermicompost obtenido a partir de diversos residuos orgánicos [13,15,54], persiste una elevada variabilidad metodológica entre estudios. Esta inconsistencia se manifiesta principalmente en las dosis de aplicación y las condiciones edáficas evaluadas [16,26], así como en las proporciones de mezcla del sustrato, los procedimientos de compostaje y vermicompostaje empleados, los criterios de madurez del producto final y los cultivares seleccionados para los ensayos experimentales [55-59]. Esta situación limita la comparación directa de resultados y evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones multidisciplinarias que integren variables agronómicas, microbiológicas, económicas y ambientales bajo condiciones experimentales estandarizadas [12,25,31,43,53,59].

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis crítico de la literatura científica relacionada con el vermicompostaje de residuos derivados del café mediante el uso de *Eisenia fetida*, orientado a evaluar su potencial como estrategia sustentable para el aprovechamiento de residuos agroindustriales dentro de modelos de economía circular. A partir de la revisión de investigaciones nacionales e internacionales, fue posible identificar una amplia variedad de aplicaciones del vermicompostaje en residuos como pulpa, cascarilla y borra de café, así como las principales condiciones fisicoquímicas y biológicas que influyen en la eficiencia del proceso.

Los resultados obtenidos demuestran que el vermicompostaje constituye una alternativa eficiente para la estabilización biológica de residuos cafetaleros, permitiendo reducir la relación carbono/nitrógeno, incrementar la disponibilidad de nutrientes y mejorar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo [15,25,28,50,60]. Asimismo, diversos estudios reportan que la actividad biológica y enzimática de *Eisenia fetida* favorece la degradación de compuestos lignocelulósicos y acelera los procesos de humificación y mineralización de nutrientes [25,26,43]. En comparación con el compostaje convencional, el vermicompostaje presenta ventajas relacionadas con una mayor velocidad de degradación, mejor calidad agronómica del producto final, mayor disponibilidad nutrimental y una respuesta más favorable en el crecimiento y rendimiento de los cultivos [25,26,43,56,61].

El análisis comparativo de los estudios revisados permitió identificar discrepancias importantes respecto a las condiciones óptimas de operación. Mientras algunas investigaciones reportan elevada eficiencia biológica, rápida estabilización del material y producción de vermicompost de alta calidad mediante el uso de residuos de café solos o combinados con otros materiales orgánicos [8,25,58,62,63], otras señalan limitaciones asociadas a la acidez, la presencia de compuestos fenólicos y las proporciones excesivas de residuos cafetaleros dentro de las mezclas de sustrato [18,26,29]. Otros estudios señalan limitaciones asociadas con la presencia de cafeína, taninos y compuestos fenólicos, los cuales pueden afectar la supervivencia y actividad biológica de *Eisenia fetida* [18,21,26,29,36]. Asimismo, se ha documentado que la respuesta biológica de las lombrices y la eficiencia del proceso pueden variar significativamente en función de las características del residuo, las condiciones de manejo y la metodología experimental empleada [59,64]. Estas diferencias evidencian que la eficiencia del vermicompostaje depende significativamente de variables como la humedad, la temperatura, la aireación, la proporción de mezcla, las características químicas del residuo utilizado y las condiciones de manejo del sistema, factores que influyen directamente en la actividad biológica de *Eisenia fetida*, la velocidad de estabilización de la materia orgánica y la calidad final del vermicompost obtenido [25,32,34,43,60,65]. Asimismo, la elevada heterogeneidad metodológica observada entre investigaciones limita la comparación directa de resultados y

dificulta establecer protocolos universales para el aprovechamiento de residuos cafetaleros.

Desde el punto de vista ambiental, los estudios revisados muestran que el vermicompostaje contribuye a disminuir problemas asociados con la acumulación de residuos sólidos orgánicos, las emisiones contaminantes y los procesos de degradación ambiental, al favorecer la valorización de residuos, el reciclaje de nutrientes y la recuperación de materia orgánica dentro de esquemas de economía circular y producción sostenible [4,12,25,31,60,65]. Además, la reutilización de residuos derivados del café para la producción de biofertilizantes representa una estrategia con potencial para fortalecer sistemas agrícolas sostenibles, mejorar la fertilidad del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes químicos convencionales mediante el reciclaje de nutrientes y el aprovechamiento integral de subproductos agroindustriales [15,28,50,63,64,66]. No obstante, gran parte de las investigaciones disponibles se desarrollan a escala laboratorio, existiendo todavía información limitada relacionada con viabilidad económica, escalamiento industrial y evaluación de largo plazo del impacto agronómico del vermicompostaje derivado de residuos cafetaleros [12,31,38].

En conjunto, la evidencia científica disponible permite considerar al vermicompostaje con *Eisenia fetida* como una tecnología prometedora para el manejo sustentable de residuos agroindustriales derivados del café, debido a su capacidad para transformar subproductos orgánicos en materiales con potencial agronómico y valor ambiental [59,67,68]. Como perspectiva futura, resulta necesario desarrollar investigaciones multidisciplinarias bajo condiciones experimentales estandarizadas, incorporando análisis agronómicos, microbiológicos, ambientales y económicos que permitan fortalecer la viabilidad técnica y comercial de esta tecnología [10,12,38,59]. Asimismo, será fundamental ampliar los estudios a escala piloto e industrial para evaluar el comportamiento del vermicompostaje en sistemas productivos reales y determinar su impacto sobre variables relacionadas con la fertilidad del suelo, la productividad agrícola, la sostenibilidad ambiental y la economía circular [12,52,67,68].

REFERENCIAS

- [1] Rizzuto Q and Liliana, M (2014). "El mercado mundial del café: tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad," *Visión Gerenc.*, no. 2, pp. 291–307.
- [2] Urrego, W., & Godoy, M. (2021). Aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica. *Prospectiva*, 19 (2).
- [3] M. Ilangoan, V. Guna, C. Hu, A. Takemura, Z. Leman, and N. Reddy, (2019). "Dehulled coffee husk based biocomposites for green building materials," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*
- [4] Battista, F., Zanzoni, S., Strazzer, G., Andreolli, M., & Bolzonella, D. (2020). The cascade biorefinery approach for the valorization of spent coffee grounds. *Renewable Energy*, 157, 1203–1211. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.113>.
- [5] Rodríguez, J. M. L., & Palma, A. (2023). Valorización de Posos de Café: un Enfoque de Economía Circular. In *Actas de las V Jornadas Scien City 2022: Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes* (pp. 55-57). Universidad de Huelva.
- [6] Bedaiwy, M. N. A., Maksoud, Y. S. A., & Saad, A. F. (2019). Coffee grounds as a soil conditioner: Effects on physical and mechanical

- properties—II. Effects on mechanical properties. *Polish Journal of Soil Science*, 52(2), 277.
- [7] Moussa, T., Maalouf, C., Ghanem, A., Bliard, C., Abbes, B., Badouard, C., Lachi, M., Bufalino, L., Bogard, F., & Polidori, G. (2024). Physicomechanical and hygrothermal characterization of a sugarcane waste / spent coffee grounds composite for buildings. *Waste and Biomass Valorization*, 15(9), 5431–5443. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02537-w>.
- [8] Hanc, A., & Dreslova, M. (2021). Conversion of spent coffee grounds into vermicompost. *Bioresource Technology*, 341, 125827. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125827>.
- [9] Vardon, D.R., Moser, B.R., Zheng, W., Witkin, K., Evangelista, R.L., Strathmann, T.J., Rajagopalan, K., Sharma, B.K. (2013). Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar. *ACS Sustain Chem Eng*, 1, 1286–1294. https://doi.org/10.1021/SC400145W/SUPPL_FILE/SC400145W_SI_001.PDF.
- [10] Ramos-Suárez, J. L., Ritter, A., Mata-González, J., & Camacho-Pérez, A. (2021). Biotechnological applications of coffee waste: Recent advances and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101592. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101592>.
- [11] Murthy, P.S., Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry byproducts and value addition—A review. *Resour Conserv Recycl*, 66, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>.
- [12] Phrommarat, B., & Paopuree, P. (2024). Assessing the environmental performance of vermicompost from spent coffee grounds based on a life cycle approach. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 13(5), 1–10. <https://doi.org/10.57647/ijrowa-tgma-wb03>.
- [13] González-Moreno, M. A., García Gracianteparaluceta, B., Marcelino Sádaba, S., Zaratiegui Urdin, J., Robles Domínguez, E., Pérez Ezcurdia, M. A., & Seco Meneses, A. (2020). Feasibility of Vermicomposting of Spent Coffee Grounds and Silverskin from Coffee Industries: A Laboratory Study. *Agronomy*, 10(8), 1125. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081125>.
- [14] Sharma, K., Garg, V. K., & Gupta, R. (2021). Vermicomposting of organic wastes: A sustainable approach for waste management and nutrient recycling. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100745. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100745>.
- [15] Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Atiyeh, R., & Metzger, J. D. (2004). Effects of vermicomposts produced from food waste on the growth and yields of greenhouse peppers. *Bioresource Technology*, 93(2), 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.015>.
- [16] Lim, S. L., Wu, T. Y., Lim, P. N., & Shak, K. P. Y. (2015). The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1143–1156. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6849>.
- [17] Atiyeh, R. M., Lee, S., Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Metzger, J. D. (2002). The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology*, 84(1), 7–14. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00017](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00017).
- [18] Hu, Y., et al. (2024). Spent Coffee Ground and Its Derivatives as Soil Amendments: A Review. *Agronomy*, 15(1), 26. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010026>.
- [19] Sunset, 2009. Add Used Coffee Grounds to Your Garden Soil and Get Amazing Results. Soil and Plant Laboratory Inc., Bellevue, WA, <http://www.sunset.com/garden/earth-friendly/starbucks-coffee-compost-test>.
- [20] Pennsylvania State College of Agric. Sci., 2007. Delaware County Máster Gardener Program.
- [21] Rosas-Calleja, D., Ortiz-Laurel, H., Herrera-Corredor, J. A., & Leyva-Ovalle, O. R. (2016). Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencial de aplicación a suelos agrícolas.
- [22] Hernández, J., Suárez, J., & Pérez, A. (2011). Caracterización de pulpa de café y evaluación de su aptitud para compostaje. *Agrociencia*, 45(3), 345–357.
- [23] Pandey, A., Soccol, C. R., & Nigam, P. (2000). Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. *Biochemical Engineering Journal*, 6(2), 153–162.
- [24] Molina, E., & Zuluaga, C. (2017). Caracterización fisicoquímica de subproductos del beneficio del café y su potencial uso agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 70(2), 8141–8152.
- [25] Hanc, A., Chadimova, Z., & Vasak, F. (2019). Processing of spent coffee grounds by vermicomposting and composting techniques. *Waste Management*, 87, 626–631. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.031>.
- [26] Smolskii, E., et al. (2025). Effect of Composting and Vermicomposting on Spent Coffee Grounds for Agricultural Use. *Agronomy*, 15(12), 2823. <https://doi.org/10.3390/agronomy15122823>.
- [27] Orozco, F. H., Cegarra, J., Trujillo, L. M., & Roig, A. (1996). Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia fetida*: Effects on C and N contents and the availability of nutrients. *Biology and Fertility of Soils*, 22(3), 162–166. <https://doi.org/10.1007/BF00384449>.
- [28] Hernández-Rodríguez, O. A., Morales-Corts, M. R., Gómez-Sánchez, M. A., & Pérez-Sánchez, R. (2017). Use of coffee wastes as an organic amendment in agriculture. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(4), 281–292. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0178-9>.
- [29] Liu, K., Price, G. W., & Burton, D. L. (2011). Evaluation of three composting systems for the management of spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, 102(17), 7966–7974. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.073>.
- [30] Trujillo-González, J. M., et al. (2024). A comprehensive review of composting from coffee waste. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*.
- [31] Makris, F. (2025). Vermicomposting spent coffee grounds with *Eisenia fetida*. *Biology and Life Sciences Forum*, 2025.
- [32] Camacho Ramírez, J. (1997). Evaluación del proceso de descomposición de pulpa de café por la lombriz de tierra *Eisenia fetida* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica]. Repositorio UNA. <http://hdl.handle.net/11056/20987>.
- [33] Flores Pincay, E. A. (2025). Producción de humus de lombriz roja californiana *Eisenia foetida* en diferentes sustratos y densidades de crianza [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador]. Repositorio UPSE. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12968>.
- [34] Domínguez, J., Edwards, C. A., & Webster, M. (2000). Vermicomposting of sewage sludge: Effect of bulking materials on the growth and reproduction of the earthworm *Eisenia fetida*. *Pedobiología*, 44(1), 24–32.
- [35] Suthar, S., & Singh, S. (2008). Vermicomposting of domestic waste by using two epigeic earthworms (*Perionyx excavatus* and *Perionyx sansibaricus*). *International Journal of Environment and Waste Management*, 2(1–2), 84–101.
- [36] Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012>.
- [37] Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661–672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>.
- [38] Janissen, B., & Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>.
- [39] Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2014). Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, 7(12), 3493–3503. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>.
- [40] Cruz, R., Cardoso, M. M., Fernandes, L., Oliveira, M., Mendes, E., Baptista, P., Morais, S., & Casal, S. (2012). Espresso coffee residues: A valuable source of unextracted compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(32), 7777–7784. <https://doi.org/10.1021/jf3018854>.
- [41] Aranda, E. (1995). Coffee Pulp Vermicomposting Treatment. In *Coffee Biotechnology and Quality* (pp. 393–398). Springer.
- [42] Siles Calvo, J. (1997). Producción de abono orgánico con pulpa de café mediante el lombricompostaje [Tesis de maestría, CATIE, Costa Rica]. Repositorio CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10468>.
- [43] Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2008). Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*, 72(7), 1013–1019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.016>.
- [44] Suthar, S. (2009). Vermistabilization of wastewater sludge from milk processing industry. *Ecological Engineering*, 35(7), 1021–1028. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.007>.
- [45] Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (2011). Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management. CRC Press.
- [46] Singh, J., Kalamdhad, A. S., & Ali, M. (2020). Vermicomposting of organic wastes: A review on process, quality, and applications.

- Environmental Technology Reviews*, 9(1), 63–78. <https://doi.org/10.1080/21622515.2020.1730885>.
- [47] Awasthi, M. K., Pandey, A. K., Bundela, P. S., & Khan, J. (2015). Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. *Bioresource Technology*, 182, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.104>.
- [48] Ordoñez-Arévalo, B., Guillén-Navarro, K., & Huerta, E. (2018). Enzymatic dynamics into the *Eisenia fetida* gut during vermicomposting of coffee husk and market waste in a tropical environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1576–1586. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0572-3>.
- [49] Aira, M., Monroy, F., & Domínguez, J. (2007). *Eisenia fetida* activates fungal and bacterial growth in pig manure. *Process Biochemistry*, 42(5), 763–770. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.11.013>.
- [50] Yadav, A., & Garg, V. K. (2011). Recycling of organic wastes by employing earthworms. *Bioresource Technology*, 102(3), 2874–2880. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.083>.
- [51] Raza, S. T., Bo, Z., Ali, Z., & Liang, T. J. (2019). Vermicomposting by *Eisenia fetida* is a sustainable and eco-friendly technology for better nutrient recovery and organic waste management in upland areas of China. *Pakistan Journal of Zoology*, 51(3), 1027–1034. <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2019.51.3.1027.1034>.
- [52] Lim, S. L., Lee, L. H., & Wu, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 111, 262–278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083>.
- [53] Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In C. A. Edwards, N. Q. Arancon, & R. Sherman (Eds.), *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* (pp. 27–40). CRC Press.
- [54] Adi, A. J., & Noor, Z. M. (2009). Waste recycling: Utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresource Technology*, 100(2), 1027–1030. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.024>.
- [55] Nogales, R., Cifuentes, C., & Benítez, E. (2005). Vermicomposting of winery wastes: A laboratory study. *Environmental International*, 31(5), 659–664. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.10.009>.
- [56] Telila, Z., Shifera, B., & Debela, T. (2025). Harnessing *Eisenia fetida* for the vermiconversion of biodegradable wastes in Dambi Dollo town, Ethiopia. *Scientific Reports*, 15, 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28044-z>.
- [57] Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>.
- [58] Gajalakshmi, S., & Abbasi, S. A. (2008). Solid waste management by composting: State of the art. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 38(5), 311–400. <https://doi.org/10.1080/10643380701413633>.
- [59] Domínguez, J. (2004). State-of-the-art and new perspectives on vermicomposting research. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm Ecology* (pp. 401–424). CRC Press.
- [60] Sinha, R. K., Herat, I. S., Bharambe, G., & Brahmabhatt, A. (2008). Vermistabilization of sewage sludge by earthworms. *Bioresource Technology*, 97(3), 391–395. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.051>.
- [61] Gutiérrez-Miceli, F. A., Santiago-Borraz, J., Molina, J. A. E., Nafate, C. C., Abud-Archila, M., Llaven, M. A. O., Rincón-Rosales, R., & Dendooven, L. (2007). Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato. *Bioresource Technology*, 98(15), 2781–2786. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.032>.
- [62] Manyuchi, M. M., Phiri, A., & Muredzi, P. (2013). Comparison of vermicompost and compost efficacy on tomato growth. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2(12), 84–92.
- [63] Hanc, A., Tonika, J., & Tlustoš, P. (2021). Conversion of spent coffee grounds into vermicompost. *Bioresource Technology*, 341, 125877. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125877>.
- [64] Sánchez-Hernández, J. C., Ro, K. S., & Díaz-Raviña, M. (2017). Vermicompost derived from spent coffee grounds. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13491–13500.
- [65] Wong, J. W. C., Mak, K. F., Chan, N. W., Lam, A., Fang, M., Zhou, L. X., Wu, Q. T., & Liao, X. D. (2001). Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. *Bioresource Technology*, 76(2), 99–106. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00103-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00103-6).
- [66] Zergaw, Y., Alemayehu, G., & Tadesse, A. (2023). Direct application of coffee pulp vermicompost produced by *Eisenia fetida* on hot pepper growth and soil properties. *The Scientific World Journal*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8854821>.
- [67] Mendes, L. A., et al. (2024). Spent coffee grounds as a suitable alternative to standard soil substrates. *Scientific Reports*, 14, 4567. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54612-5>.
- [68] Sánchez, C., et al. (2019). Potencial agronómico del vermicompost obtenido a partir de subproductos agroindustriales del café. *Revista Iberoamericana de Ciencias Ambientales*, 10(4), 115–128.