

Caracterización de un fertilizante elaborado con *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia¹

Characterization of a fertilizer made with Lemna sp. through anaerobic biodigestion


Bárbara del V. Almarza-Colmenares

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0009-9656-994X> | Correo electrónico: barbaraalmarza11@gmail.com

Lys D. Oñatez-Ríncón

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0000-0973-0964> | Correo electrónico: lysdaniella11@gmail.com

Laugeny C. Díaz-Borrego

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.

Universidad del Zulia, Facultad Experimental de Ciencias, Departamento de Biología, Laboratorio de Microorganismos Fotosintéticos. Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0000-0002-8263-081X> | Correo electrónico: laugenydiaz221172@gmail.com

Recibido:22-11-2025 Admitido: 01-12-2025 Aprobado:04-12-2025

DOI:

Resumen

El objetivo de esta investigación consistió en la caracterización de un fertilizante elaborado con *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia. La investigación fue del tipo explicativa y analítica con un diseño experimental y cuantitativo en la que se llevó a cabo la construcción de nueve biodigestores que emplearon dos tratamientos y un control, por triplicado. Los tratamientos consistieron en: T1: 50% *Lemna* sp., 25% estiércol, 25% melaza y T2: 25% *Lemna* sp., 37,5% estiércol, 37,5% melaza, y el control 50% estiércol, 50% melaza. Se midieron parámetros como: volumen, pH, conductividad eléctrica (CE), nitrógeno (NT), fósforo (P), carbono orgánico (CO) y materia orgánica (MO); y luego se comparó con un producto comercial elaborado con humus de lombriz, mediante un análisis de varianza. Como resultado, se obtuvo que los tratamientos tuvieron un comportamiento similar entre sí en cuanto a los parámetros analizados, con pH bajo ($4,34 \pm 0,02$ en T1 y $4,49 \pm 0,01$ en T2) y elevada conductividad eléctrica ($11,80 \pm 0,29$ dS/m en T1 y $9,53 \pm 0,49$ dS/m en T2) que afectaron al resto de los parámetros y la calidad del fertilizante; mientras que, el control y el fertilizante comercial fueron similares en cuanto al CO ($12,04\% \pm 0,16$ y $12,75\% \pm 0,05$) y la MO ($20,74\% \pm 0,16$ y $21,97\% \pm 0,12$), respectivamente. Se concluye que los biodigestores construidos son una alternativa económica para la producción de fertilizantes, destacando la importancia de considerar los componentes y proporciones de las materias primas y de la aireación luego de la biodigestión anaerobia, para optimizar la calidad del fertilizante. Además, la incorporación de aditivos en los fertilizantes producidos es necesaria, para mejorar las características del producto final.

Palabras clave: Biodigestión anaerobia, *Lemna*, biofertilizante, caracterización fisicoquímica, aprovechamiento de biomasa.

Abstract

The objective of this research was to characterize a fertilizer made with *Lemna* sp. by anaerobic biodigestion. The research was of the explanatory and analytical type with an experimental and quantitative design in which the construction of nine biodigesters was carried out that used two treatments and a control, in triplicate. The treatments consisted of: T1: 50% *Lemna* sp., 25% manure, 25% molasses and T2: 25% *Lemna* sp., 37.5% manure, 37.5% molasses, and the control 50% manure, 50% molasses. Parameters such as volume, pH, electrical conductivity (EC), nitrogen (TN), phosphorus (P), organic carbon (CO)

¹Artículo adaptado de la ponencia presentada en la II Jornada de Ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta, 2025.

and organic matter (OM) were measured; and then it was compared with a commercial product made with worm humus, through an analysis of variance. As a result, it was obtained that the treatments had a similar behavior among themselves in terms of the parameters analyzed, with low pH (4.34 ± 0.02 in T1 and 4.49 ± 0.01 in T2) and high electrical conductivity (11.80 ± 0.29 dS/m in T1 and 9.53 ± 0.49 dS/m in T2) that affected the rest of the parameters and the quality of the fertilizer; while the control and the commercial fertilizer were similar in terms of CO ($12.04\% \pm 0.16$ and $12.75\% \pm 0.05$) and OM ($20.74\% \pm 0.16$ and $21.97\% \pm 0.12$), respectively. It is concluded that the constructed biodigesters are an economic alternative for the production of fertilizers, highlighting the importance of considering the components and proportions of the raw materials and the aeration after anaerobic biodigestion to optimize the quality of the fertilizer. Furthermore, the incorporation of additives into the fertilizers produced is necessary to improve the characteristics of the final product.

Keywords: Anaerobic digestion, *Lemna*, biofertilizer, physicochemical characterization, biomass processing.

Introducción

La creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y las prácticas agrícolas responsables han renovado el interés en los fertilizantes orgánicos. El uso de recursos naturales como *Lemna* sp. surge como una alternativa viable para la producción de fertilizantes. Esta investigación se enfoca en la caracterización de un fertilizante de *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia, la cual, se erige como una solución efectiva, transformando la materia orgánica en fertilizantes ricos en nutrientes, al tiempo que se minimizan los impactos ambientales asociados con el uso de fertilizantes químicos, especialmente en el Lago de Maracaibo, siendo este afectado por la eutrofización debido a exceso de nutrientes como fósforo y nitrógeno.

Por esta misma razón, Cartagena [1] en el año 2018 en su trabajo de investigación realizó un análisis de factibilidad para la obtención de un biofertilizante producido a través de la especie *Eichhornia crassipes* procedente de la laguna del Limoconcha, describiendo una propuesta de control del crecimiento de *Eichhornia crassipes*, por medio de la elaboración de un biofertilizante orgánico a partir de la macrófita, mediante la biodigestión anaerobia.

El presente estudio propone construir biodigestores anaerobios para obtener fertilizante con *Lemna* sp., utilizando estiércol y melaza para la elaboración de las unidades experimentales. Similarmente, Jaramillo [2] en el año 2011 desarrolló y puso en funcionamiento un biodigestor con una tecnología apropiada, que requirió de una baja inversión de capital, con materiales adquiridos en la región, sin complejidad técnica.

Por lo anteriormente expuesto, en esta investigación se persigue como objetivo caracterizar un fertilizante orgánico basado en la planta acuática *Lemna* sp. obtenida de la región zuliana, así como también construir un biodigestor anaerobio para la obtención de los fertilizantes, analizar el fertilizante obtenido físicoquímica y sensorialmente y compararlo con un fertilizante comercial.

Materiales y Métodos

Se realizó una investigación de tipo explicativa y analítica, con un nivel aprehensivo y un diseño experimental y cuantitativo, dando lugar a la caracterización de un fertilizante elaborado con *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia a partir de la planta acuática, melaza y estiércol.

Fase I. Construcción de biodigestores anaerobios adecuados para la obtención de un fertilizante

Para el desarrollo de la presente fase, se realizaron una serie de actividades:

Selección de materiales

Se siguió el procedimiento recomendado por Cartagena [1], con el objetivo de seleccionar los materiales adecuados para la construcción de los biodigestores. En la Tabla 1, se listan los materiales utilizados en la construcción de los biodigestores, indicando cantidad y tipo de insumo.

Tabla 1. Materiales seleccionados

| Material | Figura | Característica |
|-----------------------------|---|---|
| Bidón de plástico |  | Capacidad de 20 L. Uno por Biodigestor |
| Manguera transparente de ½" |  | 0,80 metros por biodigestor |
| Válvulas de ½" |  | Uno por biodigestor |
| Fitting de ½" |  | Uno por biodigestor |
| Abrazaderas de metal de ½" |  | Uno por biodigestor |
| Silicón transparente |  | Marca TOTAL |
| Botella de plástico de 1 L |  | Uno por biodigestor |
| Cinta plástica para embalar |  | Marca Morropac® |

Diseño de biodigestores

Se procedió al diseño de los biodigestores, basado en un biodigestor tipo “batch”, también conocido como reactor discontinuo. Los reactores discontinuos se operan llenando el reactor con los reactivos al inicio (lote), luego ocurre la reacción en un tiempo determinado en condiciones controladas, y al finalizar, se retira parte o la totalidad del contenido del reactor. La agitación puede o no ser parte de la operación de un reactor discontinuo. Según lo establecido por Laurel [3], las ventajas de un reactor discontinuo incluyen: facilidad de operación, ausencia de mezcla mecánica y alta eficiencia de eliminación de un contaminante individual.

En esta etapa, se llevó a cabo el diseño del biodigestor utilizando el programa AutoCAD, el cual se centró en que cada parte del biodigestor estuviera integrada de manera eficiente para maximizar la producción de biogás y la calidad del digestato. Cada componente fue diseñado teniendo en cuenta aspectos como, la resistencia estructural, la facilidad de mantenimiento y la eficiencia en la recolección del biogás.

Construcción de biodigestores

Luego de la obtención de los materiales y la elaboración del plano del diseño, se procedió a la construcción de los biodigestores, siguiendo lo señalado por los autores Guerra y Páez [4] y contando con la guía de un Ingeniero Mecánico.

Fase II. Análisis fisicoquímico y sensorial de los fertilizantes obtenidos basados en *Lemna* sp. en los diferentes tratamientos

Para esta fase, se llevó a cabo la preparación de los fertilizantes mediante el proceso de biodigestión anaerobia. Para lo cual, se trabajó con dos tratamientos y un control, con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes proporciones de la *Lemna* sp. y otros aditivos en la calidad fisicoquímica y sensorial de los fertilizantes.

Selección de materias primas

Esta selección partió del análisis de varios materiales conocidos por su efectividad en la elaboración de fertilizantes, destacando entre ellos la melaza y el estiércol bovino. La melaza es rica en elementos que favorecen el desarrollo de una gran variedad de microorganismos, su composición llega a variar dependiendo del manejo a nivel industrial y agrícola según lo señalado por Agüero [5]. Por su lado, López [6] plantea que, el estiércol que se genera en las unidades de producción de leche, se puede utilizar para mejorar las propiedades del suelo, además de aportar cantidades considerables de nitrógeno (N) y otros nutrientes esenciales para los cultivos. La materia prima principal *Lemna* sp., también conocida como lenteja de agua, fue recolectada de un jagüey ubicado en Bachaquero, municipio Valmore Rodríguez, estado Zulia.

Lavado de la *Lemna* sp.

Dado que la *Lemna* sp. presentó una considerable cantidad de residuos como ramas, petróleo, animales muertos y otros materiales indeseables, fue necesario realizar un proceso de limpieza exhaustivo. Se llevó a cabo un procedimiento en varias etapas para la separación de la *Lemna* sp. que flotaba en la superficie, empleando un colador para recolectar cuidadosamente la planta, asegurando que solo se extrajera la parte limpia y deseada.

Homogeneización del material

Para este proceso, en primer lugar, se introdujo la *Lemna* sp. recolectada en una licuadora marca Oster Classic modelo GS-4655, utilizando una relación de 80 mL de agua por cada 100 gramos de *Lemna* sp., y se procesó la mezcla hasta alcanzar la consistencia deseada, lo que facilitó la integración de la planta en el proceso de biodigestión anaerobia. En segundo lugar, se realizó la dilución y homogeneización del estiércol, mediante una relación de 6,5 litros de agua por cada 8 kg de estiércol.

Preparación de tratamientos y control

Se llevó a cabo un total de tres tratamientos, de los cuales dos incluyeron melaza, estiércol y *Lemna sp.* a diferentes proporciones; mientras que, el que no contuvo *Lemna sp.* sirvió como control. Este diseño permitió evaluar la influencia de *Lemna sp.* en los tratamientos, comparando su efectividad en la calidad del fertilizante, tal como lo establecido por Bonetta *et al.*, [7] en su estudio sobre elaboración de fertilizantes, en el cual dos de los tratamientos incluyeron la adición de residuos de plantas; mientras que, el tercer tratamiento se utilizó como control, sin la adición de estos residuos.

Los tratamientos se realizaron por triplicado. Montgomery [8] establece que la realización de los tratamientos por triplicado es fundamental para garantizar la repetibilidad y la validez estadística de los resultados obtenidos, porque permite reducir la variabilidad de los datos y proporciona una estimación más precisa de la media y la variación de los resultados.

A continuación, se presentan las proporciones de los reactivos utilizados en cada uno de los tratamientos y el control (Tabla 2):

Tabla 2. Proporciones de reactivos en tratamientos y control

| | Control | | Trat 1 | | | Trat 2 | | |
|----|---------|-----------|------------------|--------|-----------|------------------|--------|-----------|
| | Melaza | Estiércol | <i>Lemna sp.</i> | Melaza | Estiércol | <i>Lemna sp.</i> | Melaza | Estiércol |
| | 50% | 50% | 50% | 25% | 25% | 25% | 37,5% | 37,5% |
| R1 | 3 L | 3 L | 3 L | 1,5 L | 1,5 L | 1,5 L | 2,25 L | 2,25 L |
| R2 | 3 L | 3 L | 3 L | 1,5 L | 1,5 L | 1,5 L | 2,25 L | 2,25 L |
| R3 | 3 L | 3 L | 3 L | 1,5 L | 1,5 L | 1,5 L | 2,25 L | 2,25 L |

R1: repetición 1, R2: repetición 2, R3: repetición 3.

Monitoreo diario del pH

El pH debe ser monitoreado para evaluar su comportamiento a lo largo del tiempo durante la biodigestión. Cruz *et al.*, [9] indican que un pH cercano a 5 es indicativo de un ambiente favorable para la actividad de los microorganismos anaerobios. La digestión anaerobia descompone la materia orgánica sin oxígeno, generando ácidos orgánicos que tienden a disminuir el pH. Por lo que, durante el proceso de biodigestión anaerobia, se monitoreó el pH por 13 días para evaluar su estabilidad en los tratamientos. Siguiendo lo planteado por García *et al.*, [10], la decisión de interrumpir el proceso de biodigestión se tomó cuando se obtuvieron al menos dos repeticiones del pH en un rango cercano a 5, un indicador de equilibrio y adecuada descomposición de los sustratos.

En los primeros ocho días, se utilizaron tiras medidoras de pH marca Tasomed para las mediciones. A partir del noveno día, se empleó un pH-metro marca Thermo Scientific, modelo VSTR40A2 Orion para obtener mediciones cuantitativas precisas. Una vez alcanzado el pH deseado, se procedió a destapar el biodigestor para permitir la entrada de oxígeno, fomentando la actividad de microorganismos aerobios que descomponen los ácidos orgánicos acumulados. Al respecto, se ha establecido que la liberación de iones OH⁻ ayuda a incrementar el pH y mejora las características químicas y biológicas del biofertilizante [11].

Envasado de los fertilizantes

Una vez finalizado el proceso de digestión anaerobia, se tamizaron los fertilizantes con una malla de 1 mm para separar la fracción líquida rica en nutrientes, de la fracción sólida, siguiendo las indicaciones de López *et al.*, [12] quien menciona que, la separación de la fracción líquida del estiércol fermentado es fundamental para obtener un fertilizante líquido concentrado. De esta forma, la fracción líquida se envasó en

recipientes de plástico de 1 litro previamente desinfectados, según las recomendaciones de la ISO Standard 11607-1:2019/Amd 1:2023 [13]. Para la desinfección de los envases se siguió el protocolo de González *et al.*, [14], empleando jabón y agua caliente, seguido por enjuague con agua limpia y desinfección con alcohol al 70%.

Análisis fisicoquímicos

Se evaluaron parámetros clave para caracterizar la calidad de los fertilizantes obtenidos tras la digestión anaerobia, tanto en los tratamientos como en el control.

Conductividad eléctrica

En primer lugar, se calibró el conductímetro marca: Lutron, modelo: PCD-431, y luego se procedió a la preparación de la muestra para medir la conductividad eléctrica, registrando la lectura correspondiente.

pH

Se calibró el pH-metro de mesa, modelo PHS 3C y se procedió a la preparación de la muestra para llevar a cabo la medición con el pH-metro, registrando el valor del pH.

Nitrógeno total

El nitrógeno total se estimó de acuerdo al método de Kjeldahl [15]. Para ello, se pesó la muestra para llevar a cabo la digestión a 600 °C. Se enfrió y adicionó agua destilada para proceder con la destilación en el equipo de destilación automática Marca Tanaka, modelo AD-7. Se tituló con HCl y se calculó el contenido de nitrógeno presente en la muestra.

Carbono orgánico

La estimación del carbono orgánico se realizó mediante el método de Walkley-Black. El método consistió en la oxidación de la materia orgánica a 120 °C con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico, y la titulación del excedente se realizó con sulfato ferrosol, según lo establecido por Carreira y Mous [16].

Se pesó 1,0 g de muestra de suelo y se colocó en un Erlenmeyer de 500 mL, se agregaron 10 mL de dicromato de potasio 1N y se mezcló suavemente. Luego se adicionó 20 mL de ácido sulfúrico concentrado, se mezcló por un minuto y se dejó reposar 30 minutos, se agregó 200 mL de agua destilada, 10 mL de ácido fosfórico al 85%, 0,2 g de NaF y 30 gotas de indicador fenantrolina. Se tituló con solución de sulfato ferroso 0,5 N hasta obtener el viraje de azul verdoso a café rojizo, según lo indicado por Nelson y Sommers [17].

Materia orgánica

El primer paso en la conversión de materia orgánica es la cuantificación del carbono orgánico, y se utilizan métodos como la oxidación húmeda o la digestión ácida para determinar el contenido de carbono orgánico [18]. Heaton *et al.*, [19] establecen que el factor de Van Bemmelen que es 0,58, se utiliza para convertir el contenido de carbono orgánico a materia orgánica, indicando que el carbono orgánico representa aproximadamente el 58% de la materia orgánica total.

Fósforo asimilable

La extracción del fósforo asimilable en las muestras se realizó con una solución de bicarbonato de sodio (NaHCO₃, 0,5 M). Se agitó la mezcla durante 30 minutos y se filtró. Para cuantificar, se mezcló 1 mL de solución diluida, 2 mL de ácido bórico y 3 mL de reactivos (ácido sulfúrico, molibdato de amonio, ácido ascórbico, tartrato antimónico de potasio y agua destilada). Pasada una hora, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro marca Genesys 20 Thermo Scientific a 882 nm, según la metodología establecida por Kuo [20].

Evaluación sensorial

Se realizó una evaluación sensorial del color, en la que se colocó una muestra del fertilizante en una superficie plana y se observó bajo la luz natural o artificial. Al mismo tiempo, se hizo una evaluación de la consistencia, según lo establecido por Baker *et al.*, [21] anotando si la misma era granular, en polvo, pastosa o líquida.

Fase III: Comparación de los fertilizantes obtenidos basados en *Lemna sp.* en los diferentes tratamientos con un fertilizante comercial, mediante análisis fisicoquímicos y sensorial.

Se hizo una comparación desde el punto de vista fisicoquímico y sensorial de los fertilizantes producidos, con el fertilizante líquido comercial marca Lumbricola a base de humus de lombriz, obtenido de la empresa Sumiateca, (Suministro y Asistencia Técnica Agropecuaria C.A), mediante el contraste de características obtenidas en los análisis practicados: pH, nitrógeno total, carbono orgánico, fósforo asimilable, color, olor, consistencia, determinados mediante los procedimientos descritos con anterioridad.

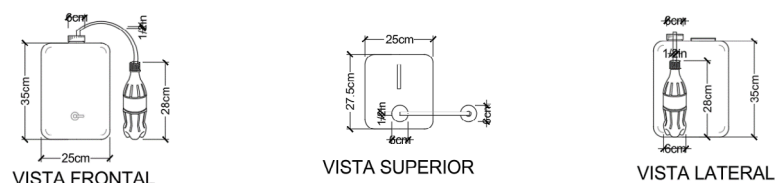
Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico (ANOVA y Test de Tukey) para determinar diferencias significativas entre los distintos tratamientos, el control y el fertilizante comercial, empleando el paquete de análisis estadístico SAS® (SAS Institute, Inc., 1989) y el programa Python Versión 3.13.

Resultados y Discusión

En esta etapa se detallan los resultados obtenidos, evidenciando el cumplimiento de los objetivos mediante el diseño seleccionado para la investigación, los instrumentos de recolección pertinentes y las fases de la investigación.

Construcción de biodigestores anaerobios adecuados para la obtención de los fertilizantes

Se construyeron nueve biodigestores cada uno con el mismo diseño, siguiendo el diseño obtenido con la herramienta AutoCAD, tal como se muestra en la siguiente figura (Figura 1):



Leyenda: La figura corresponde a imágenes de las vistas frontal, lateral y superior del diseño de los biodigestores construidos.

Figura 1. Diseño de biodigestor por AutoCAD

El biodigestor construido cuenta con un bidón de material PVC de 20 L como tanque de almacenamiento, una entrada de material para el fertilizante, una manguera transparente de 1/2" por donde se conduce el biogás a una cámara de almacenamiento (botella de plástico de 1 L) y una válvula en la parte de abajo donde se realiza la toma de muestra, para medir el pH del digestato. Este digestor fue más eficiente que el biodigestor tubular obtenido por Gómez [22], en el que se usó una bolsa plástica negra de 10 m de largo y 2,5 de ancho como tanque de almacenamiento, requiriendo de varias pruebas y remplazos, debido a que el material no tenía la elasticidad requerida y llegaba a romperse con facilidad.

Para la elaboración de los biodigestores se detallan a continuación, los costos de los materiales utilizados para la construcción de los mismos (Tabla 3):

Tabla 3. Costo de materiales y accesorios

| Ítem | Descripción | Unidad comercial | Cantidad por biodigestor | Cantidad total | Costo unitario (\$) | Costo total (\$) |
|---|------------------------------|------------------|--------------------------|----------------|---------------------|------------------|
| 1 | Bidón de 20 L | Unidad | 1 | 9 | 3 | 27 |
| 2 | Manguera transparente de ½ “ | Metro | 0,80 | 7,2 | 1 | 7,2 |
| 3 | Válvulas de ½ “ | Unidad | 1 | 9 | 0,5 | 4,5 |
| 4 | Fitting de ½ “ | Unidad | 1 | 9 | 0,5 | 4,5 |
| 5 | Abrazaderas de metal de ½ “ | Unidad | 1 | 9 | 0,5 | 4,5 |
| 6 | Silicón transparente | Unidad | 1 | 1 | 5 | 5 |
| 7 | Botella de 1 L | Litro | 1 | 9 | 0,80 | 7,2 |
| 8 | Cinta plástica para embalar | Unidad | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Total (\$) | | | | | | 63,9 ≈ 64 |
| Costo total por Litro de fertilizante (\$) | | | | | | 0,35 |

El costo por litro de fertilizante fue de \$ 0,35, lo cual coincide con lo estimado por Guerra y Páez [4], quienes obtuvieron por un biodigestor de capacidad de 500 L un costo unitario de \$ 186,50; siendo el costo por litro de fertilizante de \$ 0,37. Es importante mencionar, que los biodigestores comercializados en el país alcanzan un valor de alrededor de \$ 800, según la información proporcionada por Resinca [23], por lo que la construcción de los biodigestores en este trabajo representó un valor por litro de fertilizante obtenido, dos veces menor al biodigestor comercial.

Análisis fisicoquímicos y sensoriales de los fertilizantes obtenidos basados en *Lemna* sp. en los diferentes tratamientos

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos y sensoriales practicados a los fertilizantes producidos en los diferentes tratamientos.

Medición de volumen del fertilizante

El volumen de fertilizante obtenido para cada tratamiento y control se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4. Volumen obtenido de fertilizante

| Volumen obtenido (L) | | |
|----------------------|---|-----------|
| Muestra | Composición | Resultado |
| Control | 50% Estiércol 50% Melaza | 80,02 |
| Trat. 1 | 50% <i>Lemna</i> sp. 25% Estiércol 25% Melaza | 8,60,05 |
| Trat. 2 | 25% <i>Lemna</i> sp. 37,5% Estiércol 37,5% Melaza | 8,60,10 |

Leyenda: Trat. 1: Tratamiento 1, Trat. 2: Tratamiento 2.

No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre el volumen obtenido del Trat. 1 y el Trat. 2. dado que ambos tratamientos presentaron una media de 8,6 L; pero si se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el volumen obtenido del control con los volúmenes de los tratamientos, lo que indica que la adición de la *Lemna sp.* aumentó significativamente el volumen en comparación con el control, debido a que se ha reportado que la biomasa fresca de la planta tiene entre 92 y 95% de humedad [9].

Análisis fisicoquímicos y sensoriales

Se llevaron a cabo una serie de análisis que permitieron evaluar las propiedades de los fertilizantes producidos en los diferentes tratamientos y control (Tabla 5).

Tabla 5. Resultado de análisis fisicoquímicos y sensoriales

| Análisis | Control (50% estiércol y 50% melaza) | Trat. 1 (50% <i>Lemna sp.</i> , 25% estiércol y 25% melaza) | Trat. 2 (25% <i>Lemna sp.</i> , 37.5% estiércol y 37.5% melaza) |
|----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| pH | 4,580,01 | 4,340,02 | 4,490,01 |
| CE. (dS/m) | 7,730,29 | 11,800,29 | 9,530,49 |
| Nitrógeno total % (p/v) | 13,170,28 | 5,260,05 | 8,970,08 |
| Fósforo asimilable % (p/v) | No detectable | No detectable | No detectable |
| Carbono orgánico % (p/v) | 12,040,16 | 6,010,31 | 7,750,40 |
| Materia orgánica % (p/v) | 20,740,16 | 10,360,31 | 13,360,40 |
| Color | Marrón oscuro | Marrón claro | Marrón claro |
| Olor | Dulce | Agridulce/ fermentado | Agridulce/ Fermentado |
| Consistencia | Líquido | Líquido | Líquido |

Los valores de pH registrados en los dos tratamientos y el control (4,58; 4,34 y 4,49, respectivamente) revelan un ambiente predominantemente ácido en el digestato final. Esta tendencia, fue más evidente en los tratamientos con mayor carga de *Lemna sp.* (Trat. 1 y Trat. 2) porque este sustrato, al ser fácilmente biodegradable, promueve una actividad acelerada de las bacterias acidogénicas. Este fenómeno sugiere que la generación de ácidos fue más rápida que su transformación, lo que causó el descenso del pH. Asimismo, este nivel de acidez indicó que el proceso requirió de una fase posterior de estabilización para neutralizar el producto antes de su uso, evitando posibles efectos de inhibición microbiana o fitotoxicidad en el suelo. Este comportamiento coincide con lo expuesto por Tognetti *et al.*, [24], quienes en sus investigaciones sobre residuos orgánicos enfatizan que la calidad y madurez del fertilizante mejoran significativamente al implementar una fase de maduración posterior. Por esta razón, se sugiere que, para futuras aplicaciones, el fertilizante pase por una fase aerobia (aireación) posterior a la biodigestión, lo cual permitirá incrementar el pH de forma natural, reducir la inhibición microbiana causada por la acidez y garantizar un producto más equilibrado para los cultivos.

Los valores obtenidos para la conductividad eléctrica en los tratamientos y el control, acusaron un valor mínimo de 7,73 dS/m para el control y máximo de 11,80 dS/m para el Trat. 2, los cuales fueron notablemente altos en comparación con lo reportado por Rhoades [25], quien menciona que los valores de conductividad eléctrica en suelos agrícolas, oscilan entre 0 y 3 dS/m. Estos valores altos de conductividad eléctrica pueden

deberse a una concentración elevada de sales en las soluciones, lo que está estrechamente relacionado con la acidez y el pH de los fertilizantes, tal como lo señalan Ndegwa y Thompson [26].

Con relación al análisis de nitrógeno total, se pudo evidenciar el aumento en el contenido de nitrógeno al añadir más cantidad de estiércol al fertilizante orgánico, el cual presenta una alta concentración de compuestos nitrogenados. López [27] indica que el estiércol es considerado un fertilizante orgánico por excelencia, debido a su alto contenido en nitrógeno y de materia orgánica.

Ahora bien, en referencia al fósforo asimilable, no se logró su detección en las muestras de fertilizante, a pesar de que la acidez del medio (pH bajo) debió facilitar la liberación de este nutriente desde la estructura vegetal de la *Lemna* sp. hacia el medio líquido. Este fenómeno se puede atribuir a los altos valores de conductividad eléctrica registrados, lo que indica una elevada presencia de sales que pueden comprometer la disponibilidad del fósforo. Los resultados permiten suponer que el fósforo se vuelve menos disponible a medida que el pH disminuye y la conductividad eléctrica aumenta, lo que resalta la importancia de mantener un pH adecuado para la disponibilidad de este nutriente. En este contexto, el pH de 4 a 4,58 observado en los tratamientos analizados, puede haber llevado a la precipitación del fósforo, impidiendo su detección en las muestras estudiadas. De acuerdo con Barrow [28], en ambientes con alta concentración de cationes, el fósforo tiende a formar compuestos insolubles que limitan su asimilabilidad. Este comportamiento también se explica por lo expuesto por Jilimane [29], quien señala que un pH extremo y un desequilibrio salino afectan la estabilidad de los nutrientes; por lo tanto, la ausencia de fósforo asimilable sugiere la necesidad de una fase de estabilización posterior, que permita liberar este nutriente y mejorar la eficiencia del fertilizante antes de su aplicación al suelo.

Los resultados obtenidos para el carbono orgánico y materia orgánica en los diferentes tratamientos muestran una clara disminución en comparación con el control, con diferencias significativas ($p < 0,05$), lo que sugiere que la inclusión de *Lemna* sp. en los tratamientos pudo haber afectado negativamente la concentración de carbono orgánico. La *Lemna* sp., aunque es un recurso valioso por su capacidad de absorción de nutrientes y su potencial para mejorar la calidad del agua, pudo haber competido con otros componentes orgánicos en el proceso de digestión anaerobia, reduciendo así la cantidad de carbono orgánico disponible [30]. Se podría considerar la adición de materiales ricos en carbono a los fertilizantes obtenidos, como residuos de cultivos, compost o estiércol bien descompuesto, dado que estas enmiendas no solo incrementarían el carbono orgánico, sino que también mejorarían la actividad microbiana necesaria para la mineralización de los nutrientes en el suelo [31].

Los resultados de las evaluaciones sensoriales de los fertilizantes obtenidos de los tratamientos y el control, muestran variaciones significativas en color y olor, lo que puede atribuirse a la composición de cada mezcla y a los procesos de fermentación y descomposición que ocurren durante la biodigestión (Tabla 6).

El control, compuesto en partes iguales de estiércol y melaza, presentó un color marrón oscuro, que es típico de las mezclas ricas en materia orgánica; mientras que, el olor dulce indicó la presencia de azúcares solubles en la melaza, que pueden promover la actividad microbiana, generando un ambiente propicio para la descomposición aeróbica. Además, la consistencia líquida es esperada debido a la alta proporción de melaza, que actúa como un líquido portador en el proceso de biodigestión.

Por su parte, los fertilizantes de los Trat. 1 y Trat. 2, resultaron en fertilizantes de color marrón claro, lo que sugiere una menor concentración de sólidos en comparación con el control. El olor puede ser indicativo de una fermentación anaeróbica más pronunciada, posiblemente debido a la proporción de *Lemna* sp., que puede liberar compuestos volátiles durante su descomposición. La comparación de los resultados sensoriales entre los tratamientos sugiere que la inclusión de *Lemna* sp. afecta el perfil sensorial de los mismos. De tal forma que, el cambio en el color y el olor, junto con la consistencia líquida, refleja la interacción entre los componentes orgánicos y el proceso de biodigestión.

Comparación de los fertilizantes obtenidos basados en *Lemna sp.* en los diferentes tratamientos con un fertilizante comercial

La Tabla 6 muestra la comparación de los resultados fisicoquímicos y sensoriales obtenidos en las muestras de fertilizantes producidos en el presente trabajo con en el fertilizante comercial.

Tabla 6. Análisis fisicoquímicos y sensoriales de los fertilizantes

| Análisis | Control (50% estiércol, 50% melaza) | Trat 1. (50% <i>Lemna sp.</i> , 25% estiércol, 25% melaza) | Trat 2. (25% <i>Lemna sp.</i> , 37.5% estiércol, 37.5% melaza) | Fertilizante comercial |
|----------------------------|-------------------------------------|--|--|------------------------|
| pH | 4,580,01 | 4,340,02 | 4,490,01 | 6,800,08 |
| CE. (dS/m) | 7,730,29 | 11,800,29 | 9,530,49 | 2,400,08 |
| Nitrógeno total % (p/v) | 13,170,28 | 5,260,05 | 8,970,08 | 2,130,10 |
| Fósforo asimilable % (p/v) | No detectable | No detectable | No detectable | 1,310,03 |
| Carbono orgánico % (p/v) | 12,040,16 | 6,010,31 | 7,750,40 | 12,750,05 |
| Materia orgánica % (p/v) | 20,740,16 | 10,360,31 | 13,360,40 | 21,970,12 |
| Color | Marrón oscuro | Marrón claro | Marrón claro | Marrón oscuro |
| Olor | Dulce | Agridulce/ Fermentado | Agridulce/ Fermentado | Terroso |
| Consistencia | Líquido | Líquido | Líquido | Líquido |

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el control, los tratamientos y el fertilizante comercial, en el pH, el cual acusó un valor de $6,80 \pm 0,08$ en el fertilizante comercial y que se encuentra en el rango aceptable por la literatura para los fertilizantes en general [9]. Por otro lado, la conductividad eléctrica, presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el control, los tratamientos y el fertilizante comercial, el cual exhibió un valor de $2,400,08$ dS/m, valor aceptable de acuerdo a lo reportado en otros trabajos [25].

El nitrógeno total presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el control, los tratamientos y el producto comercial; sin embargo, se pudo evidenciar que el valor más cercano al obtenido por el fertilizante comercial fue el del Trat. 1, teniendo como resultado $5,26\% \pm 0,05$, el cual se contrasta con el valor obtenido por Jilimane [29] de $4,47\%$ empleando *Lemna minor* como material de compostaje.

El fósforo asimilable no se detectó en ninguna unidad experimental; mientras que, el fertilizante comercial dispuso de $1,31\% \pm 0,03$ de fósforo asimilable, valor dentro del rango aceptable para suelos (entre $0,5$ a 1%), lo cual se debe a que el fraccionamiento de la materia orgánica y la aireación producida por las lombrices en el humus favorecen la mineralización del fósforo, según lo descrito por Tognetti [24].

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el carbono orgánico entre todos los tratamientos y el fertilizante comercial ($12,75 \pm 0,05\%$); sin embargo, no hubo diferencia significativa ($p > 0,05$) entre el control y el producto comercial. Lo mismo ocurrió con el porcentaje de materia orgánica, el cual se relaciona directamente con el carbono orgánico, siendo el valor para el fertilizante comercial de $21,97 \pm 0,12\%$. Tal comportamiento puede deberse a que el producto comercial proviene del humus de lombriz, el cual es el producto resultante del proceso de transformación digestiva de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). Labastidas *et al.*, [32] plantean que, en este tipo de fertilizantes, la elevada carga enzimática hace que este producto sea de mayor calidad que cualquier otro abono orgánico.

Por último, se realizó una comparación de los parámetros sensoriales de los fertilizantes control, Trat. 1, Trat. 2 y el producto comercial, teniendo como resultado que el control presentó características similares al producto comercial. Ambos tratamientos, mostraron un tono marrón claro y emitieron un olor agrídulce/fermentado; mientras que, el fertilizante comercial exhibió un color marrón oscuro similar al control, pero con un olor terroso, característico del humus de lombriz, según lo señalado por Vermiduro [33].

En general, las variaciones significativas de los parámetros analizados de los fertilizantes orgánicos producidos, se deben a la composición de los materiales utilizados, que incluyen *Lemna* sp., estiércol y melaza en diferentes proporciones. González y Pérez [34] expone que la calidad y el valor nutricional de estos fertilizantes están estrechamente relacionados con los insumos seleccionados, subrayando la importancia de elegir adecuadamente las materias primas.

Adicionalmente, el manejo de los biodigestores es crucial para la eficiencia en la producción de fertilizantes orgánicos. La gestión del pH durante la biodigestión anaerobia es un factor determinante, como se pudo apreciar en este estudio, un bajo pH afectó negativamente los parámetros analizados, lo que indica que el control de este parámetro debe ser prioritario. La fase de aireación posterior a la biodigestión anaerobia, también es crítica, ya que ayuda a restaurar el equilibrio del pH y promueve un ambiente propicio para la actividad microbiana fundamentalmente mineralizadora de nutrientes. Finalmente, la incorporación de aditivos en los fertilizantes puede mejorar las características del producto final, actuando como reguladores del pH y aumentando la solubilidad de los nutrientes, lo que es especialmente relevante para la producción de fertilizantes a partir de mezclas orgánicas.

Conclusiones

El diseño de los biodigestores resultó ser una solución eficiente y económica para producir fertilizantes, ya que asegura condiciones herméticas que favorecen la biodigestión anaerobia.

La inclusión de *Lemna* sp. en los tratamientos generó un mayor volumen líquido de fertilizantes en comparación con el control; este hecho es evidencia de una actividad microbiana más intensa en la fase acidogénica. Sin embargo, los análisis fisicoquímicos revelaron que los tratamientos presentaron valores nutricionales inferiores al control. Lo anterior demuestra que la actividad se concentró en la fase acidogénica y no logró una mineralización completa de los nutrientes. Este fenómeno ocurre porque, aunque la producción de ácidos sea elevada, si el pH no se recupera, se inhibe la fase metanogénica y se limita la calidad final del producto.

Además, se halló una relación significativa entre el pH y la conductividad eléctrica con la calidad de los fertilizantes, lo que subraya la importancia de la aireación para preservar condiciones adecuadas y favorecer la presencia de fósforo y nitrógeno. Aunque el fertilizante control mostró mejores características en cuanto a carbono orgánico y materia orgánica, la *Lemna* sp. es un insumo valioso. Bajo un manejo técnico de los biodigestores, posee el potencial de producir fertilizantes orgánicos con una calidad comparable a la de los productos comerciales..

Referencias bibliográficas

[1] E. P. Cartagena Beltran, “Análisis de factibilidad para la obtención de un biofertilizante producido a través de la especie *Eichornia crassipes* procedente de la laguna del Limoncocha”, Trabajo de maestría en gestión ambiental, Universidad SEK, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2864>

[2] E. Jaramillo Calderon, “Propuesta de diseño de un biodigestor casero”, Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., 2011 [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/458694461/Propuesta-de-diseno-de-un-biodigestor-casero>

[3] T. Laurel, “Ventajas de los reactores discontinuos en el tratamiento de contaminantes,” *Journal of Environmental Engineering and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 175–182, 2001.

- [4] S. Guerra y I. Páez, *Diseño y construcción de un biodigestor doméstico para producir biogás*, Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador 2022 [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15.000/23503>
- [5] J. Agüero, “La melaza y su impacto en el desarrollo de microorganismos en la agricultura,” *Revista de Biotecnología y Agricultura*, vol. 15, no. 3, pp. 45–58, 2009.
- [6] M. A. López, “Uso del estiércol en la producción agrícola: Beneficios para el suelo y los cultivos” *Revista de Ciencias Agrarias*, vol. 15, no. 1, pp. 45–52, 2014.
- [7] S. Bonetta y M. López, “Responses of tomato plants to different rates of humic-based fertilizer and NPK fertilization,” *Journal of Agricultural Science*, vol. 6, no. 2, pp. 123–135, 2014.
- [8] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 8th ed., Wiley, 2013 [En línea], Disponible en: https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/douglas_c._montgomery-design_and_analysis_of_experiments-wiley_2012_edition_8.pdf
- [9] J. Cruz, et al. “Efectos de la biomasa de *Lemna* en el proceso de compostaje” *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 12, no. 3, pp. 45–58, 2018.
- [10] M. García, et al. “Influencia del pH en la digestión anaerobia: Indicadores de estabilidad en el proceso” *Revista de Tecnología Ambiental*, vol. 15, no. 3, pp. 78–92, 2020.
- [11] M. Bedassa, “Soil acid Management using Biochar: Review”, *Int. J. Agric. Sc. Food Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 211-217, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.17352/2455-815X.000076>
- [12] P. López and A. Martínez, “Evaluación de la eficiencia de *Lemna sp.* en la producción de biogás y su efecto en la calidad del digestato” *Journal of Environmental Management*, vol. 250, pp. 109–115, 2020.
- [13] *Packaging for terminally sterilized medical devices — Part 1: Requirements for materials, sterile barrier systems and packaging systems — Amendment 1*, ISO Standard 11607-1:2019/Amd 1:2023, 2023.
- [14] R. González, *Efectividad de métodos de limpieza en envases plásticos*, 2023.
- [15] J. Bremmer, “Método Kjeldahl para la determinación de nitrógeno en muestras orgánicas e inorgánicas” *Revista de Química Analítica*, vol. 22, no. 3, pp. 150–158, 1996.
- [16] D. Carreira y C. Mous, *Carbono orgánico (Método de Walkley & Black)*, INTA Castelar, 2020.
- [17] D. W. Nelson and L. E. Sommers, *Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of Soil Analysis: Chemical Methods*, Soil Science Society of America, 1996. [En línea]. Disponible en: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssabookser5.3.c34>
- [18] M. Ruiz Dager, C. E. Carrillo de Cori, F. Sosa, L. M. Aular, R. Mora, L. Castillo, B. Ortega, E. Castillo, E. Ramírez, J. Rodríguez, M. León, C. Silva, M. R. Tovar, A. Martínez, A. M. Reverón y F. Gámez. “Comparación de métodos para analizar materia orgánica en materiales” en *Memorias del XXII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo*, Caracas, Venezuela, pp. 20-25. 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/327402988_COMPARACION_DE_METODOS_PARA_ANALIZAR_MATERIA_ORGANICA_EN_MATERIALES_ORGANICOS
- [19] L. Heaton, M. A. Fullen, y R. Bhattacharyya, “Critical Analysis of the van Bemmelen Conversion Factor used to Convert Soil Organic Matter Data to Soil Organic Carbon Data: Comparative Analyses in a UK Loamy Sand Soil,” *España Aberto*, vol. 6, no. 1, pp. 35–44, 2016, [En línea] <https://n9.cl/0iqv6w>
- [20] S. Kuo, “Extraction of available phosphorus from soils by sodium bicarbonate” *Methods of Soil Analysis*, Soil Science Society of America, pp. 869–874, 1996.
- [21] A. V. Barker y H. A. Mills, “Essential plant nutrients: Functions and management,” en *Handbook of Plant Nutrition*, Boca Raton, FL, EE. UU.: CRC Press, 2018, pp. 1–30.

- [22] S. Gómez, *Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular*, Trabajo de grado, Departamento de CC e Ing. Materiales e Ing. Química, Carazo, Nicaragua, 2012.
- [23] Mercado Libre, *Biodigestor 1500L Resinca*. [En línea]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.ve>
- [24] C. Tognetti, F. Mazzarino, and Laos, “Improving the quality of municipal organic waste compost,” *Bioresource Technology*, vol. 98, pp. 1067–1076, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/exqgr>
- [25] J. D. Rhoades, “Electrical conductivity in soils: Measurement and interpretation,” *Journal of Soil Science*, vol. 161, no. 3, pp. 123–134, 1996.
- [26] P. M. Ndegwa y S. A. Thompson, “Integración del compostaje y vermicompostaje para la gestión de residuos orgánicos,” *Gestión de Residuos*, vol. 21, no. 3, pp. 217–227, 2001.
- [27] M. A. López, “Uso del estiércol en la producción agrícola: Beneficios para el suelo y los cultivos,” *Revista de Ciencias Agrarias*, vol. 15, no. 1, pp. 45–52, 2014.
- [28] N. J. Barrow, “Interacciones entre el fosfato y otros iones en el suelo: Implicaciones para la disponibilidad,” *Revista de Ciencia del Suelo*, vol. 81, no. 2, pp. 251–261, 2017.
- [29] K. Jilimane, “Nitrogen and phosphorus release in soil and fertiliser value of lemna minor biomass relative to chicken litter compost”, Tesis de maestría, School of Agricultural, University of KwaZulu-Natal, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://researchspace.ukzn.ac.za/items/d55eeb38-2616-42c7-a7aa-a3da1b24961c>
- [30] J. García and A. Martínez, “Evaluación de fertilizantes líquidos orgánicos: contenido de carbono y su efecto en la fertilidad del suelo” *Revista de Ciencias Agrarias*, vol. 45, no. 2, pp. 123–135, 2018.
- [31] A. López and S. Martínez, “Fertilizantes: Tipos y aplicaciones en la agricultura moderna,” *Revista de Ciencias Agrarias*, vol. 15, no. 2, pp. 45–60, 2021.
- [32] M. Labastidas and D. R. Díaz Cuellar, “El humus de lombriz o vermicompost,” *Boletín divulgativo*, Universidad de los Andes, 2007 [En línea]. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/18594>
- [33] Vermiduro, “10 datos importantes sobre el humus de lombriz” 2024 [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/z8vrwb>
- [34] R. González y S. Pérez, “Impacto de la materia orgánica en la calidad de los fertilizantes producidos por digestión anaerobia,” *Agricultural Sciences*, vol. 14, no. 3, pp. 145–158, 2022.