

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA



Producción de biol a partir de estiércol bovino y su caracterización
físicoquímica

Por:

Yazmín Alejandra Hernández Ramos

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón, Coahuila, México
Febrero 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

Producción de biol a partir de estiércol bovino y su caracterización
fisicoquímica

Por:

Yazmín Alejandra Hernández Ramos

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobado por:



MC. Blanca Patricia Peña Revuelta
Presidente



MC. Melisa Concepción Hermosillo Alba
Vocal



Dr. José Luis Reyes Carrillo
Vocal



Dra. Reyna Roxana Guillén Enríquez
Vocal suplente externo



M.E. Javier Lopez Hernández
Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Febrero 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

Producción de biol a partir de estiércol bovino y su caracterización
físicoquímica

Por:

Yazmín Alejandra Hernández Ramos

TESIS

Presentado como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobado por el Comité de Asesoría:



MC. Blanca Patricia Peña Revuelta
Asesor Principal



MC. Melisa Concepción Hermsillo Alba
Coasesor



Dr. José Luis Reyes Carrillo
Coasesor



Dra. Reyna Roxana Guillén Enríquez
Coasesor externo



M.E. Javier López Hernández

Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Febrero 2025

AGRADECIMIENTOS

A mis asesoras

M. C. Blanca Peña, Dra. Reyna Guillén y MC. Melisa Hermosillo

Por darme la oportunidad de formar parte de su equipo, además de guiarme, motivarme y apoyarme. No sólo me brindaron su conocimiento, sino que también acrecentaron mi interés por la investigación científica y, por eso, les estaré siempre agradecida. Son una total inspiración para mí.

A mis profesores

Por su esfuerzo, dedicación y compromiso, por compartir sus conocimientos conmigo, sin ustedes, este logro no sería posible. Gracias por enriquecer mi aprendizaje e inspirarme a ser una mejor estudiante y persona.

Y, por supuesto, estoy profundamente agradecida con mi querida **Alma Terra** **Máter** por permitirme ser parte de ella, me dejó una huella indeleble.

DEDICATORIA

A mis padres

Eduardo Hernández y Alejandra Ramos

Por siempre brindarme su apoyo en todo lo que necesito y estar a completa disposición de impulsarme para cumplir mis sueños, por su amor inquebrantable y, también, por siempre hacerme saber su sentir hacia mí, su orgullo. Este gran logro no hubiera sido posible sin su respaldo. Los amo.

A mis hermanos

Carlos Hernández y Wendolyn Hernández

Por su apoyo incondicional, han sido una luz en este camino, al igual que los momentos en los que con sus bromas lograban despejarme de todo. Gracias por sus consejos, por inspirarme y seguir el camino conmigo. Los amo.

A mi abuelo

Lino Ramos

Porque siempre me ha motivado, me ha orientado y me ha compartido su conocimiento, su inteligencia, su sabiduría. Lo amo y espero que, algún día, logre ser la mitad de inteligente, valiente y perseverante que usted.

A mi padrino

Carlos Rivera

Por ser un soporte emocional, una gran inspiración, una guía y una fuente de apoyo inagotable. Siempre tengo algo que aprender de usted y estoy feliz por eso.

A mis amigas

Ashley, Hannia, Jessica, Karla y Mariana

Por su amistad, que ha sido uno de los factores más importantes a lo largo de la carrera, gracias por, cada día, hacerme sonreír, incluso en los momentos de más fatiga emocional. Aprecio infinitamente su amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Biodigestores.....	3
Función de los biodigestores	4
Clasificación de los biodigestores.....	5
Digestión anaerobia.....	6
Proceso de digestión anaerobia	7
Condiciones operativas	8
Productos obtenidos a partir del biodigestor.....	10
Biogás.....	10
Biol.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS	15
Características del biodigestor.....	15
Metodología para la obtención de parámetros	16
pH y conductividad eléctrica (CE).....	16
Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT) y sólidos suspendidos fijos (SSF).....	17
Cálculos.....	19
Análisis Estadístico.....	20
Estadística Descriptiva	20
Comparación de Fechas.....	20

Análisis de Correlación	21
Software y Visualización.....	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
CONCLUSIONES.....	31
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elaboración propia. Diagrama del biodigestor ubicado en la UAAAN-UL.	15
Figura 2. Recolección de biol en el biodigestor (UAAAN-UL).	16
Figura 3. Muestras de biol en el laboratorio.	16
Figura 4. Potenciómetro sumergido en una muestra de biol.	17
Figura 5. Conductímetro sumergido en una muestra de biol.....	17
Figura 6. Cápsulas y crisoles de porcelana dentro del horno.....	18
Figura 7. . Mufla a 600 ° C para la introducción de muestras.	18
Figura 8. Proceso de pesado de cápsulas y crisoles en la balanza analítica...	18
Figura 9. Alícuotas de las muestras de biol.....	19
Figura 10. Muestras evaporadas en el horno de secado.	19
Figura 11. Obtención del peso de las cenizas en la balanza analítica.	19
Figura 12. Relación entre el pH y la CE (Spearman).	23
Figura 13. Promedio de sólidos (ST, SVT y SSF) con Desviación Estándar. ...	25

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación para obtener los ST en ppm.	19
Ecuación 2. Ecuación para obtener los SVT en ppm.....	19
Ecuación 3. Ecuación para obtener los SSF en ppm.....	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de las pruebas de Dunn para el pH.	22
Tabla 2. Resultados de las pruebas de Dunn para la CE.	23
Tabla 3. Promedio de sólidos (ST, SVT y SSF) con Desviación Estándar.	25
Tabla 4. Chi cuadrado y valor P de los sólidos (ST, SVT y SSF).	26

RESUMEN

La implementación y el uso de un biodigestor resulta beneficioso en diferentes aspectos, este sistema de descomposición de la materia orgánica mediante la digestión anaerobia es utilizado, principalmente, para la generación de biogás (gas metano) que se usa como combustible, aunque, también el biol, otro subproducto de este sistema, puede emplearse con fines agrícolas igual de prácticos. De esta manera, se les da un uso adecuado y sustentable a los residuos orgánicos, además de generar energía renovable. El biol resulta una excelente alternativa a ciertos problemas medioambientales, como el uso de fertilizantes químicos, ya que es un fertilizante orgánico. El objetivo de este trabajo es analizar y evaluar el potencial agronómico y ambiental del biol generado a partir de la digestión anaerobia de estiércol de bovino en un biodigestor, además de su caracterización obteniendo diferentes parámetros físicos y químicos. Este estudio analiza la evolución de las características fisicoquímicas del biol extraído del biodigestor ubicado en la UAAAN (UL), con énfasis en la interacción entre el pH y la conductividad eléctrica (CE), sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT) y sólidos suspendidos fijos (SSF). Se evaluó la hipótesis de que al menos una de estas variables se ve significativamente afectada conforme avanza la producción del biogás. Los resultados muestran una correlación positiva entre el pH y la CE, sugiriendo la acumulación de compuestos alcalinos. Además, se evidenció un incremento progresivo en ST y SSF, indicando una estabilización del biol. La variabilidad observada en SVT indica una fase intermedia en el proceso de digestión anaerobia. Estos hallazgos resaltan la importancia del monitoreo de los parámetros fisicoquímicos para optimizar su compatibilidad con distintos tipos de suelos. Para los parámetros de ST, SVT y SSF se utilizó el método NMX-AA-034-SCFI-2015 y, para la determinación del pH y la CE se utilizó un potenciómetro (pH-metro Milwaukee ref pH55).

Palabras clave: Acidogénesis, Acetogénesis, Biofertilizante, Biogás, Biol, Digestión anaerobia, Hidrólisis, Metanogénesis

ABSTRACT

The implementation and use of a biodigester is beneficial in different aspects, this system of decomposition of organic matter through anaerobic digestion is mainly used for the generation of biogas (methane gas) that is used as fuel, although, also the biol, another by-product of this system, can be used for agricultural purposes just as practical. In this way, organic waste is put to an appropriate and sustainable use, in addition to generating renewable energy. Biol is an excellent alternative to certain environmental problems, such as the use of chemical fertilizers, since it is an organic fertilizer. The objective of this work is to analyze and evaluate the agronomic and environmental potential of the biol generated from the anaerobic digestion of bovine manure in a biodigester, in addition to its characterization by obtaining different physical and chemical parameters. This study analyzes the evolution of the physicochemical characteristics of the biol extracted from the biodigester located at the UAAAN (UL), with emphasis on the interaction between pH and electrical conductivity (EC), total solids (TS), total volatile solids (TVS) and fixed suspended solids (FSS). It was hypothesized that at least one of these variables is significantly affected as biogas production progresses. The results show a positive correlation between pH and EC, suggesting the accumulation of alkaline compounds. In addition, a progressive increase in ST and SSF was evidenced, indicating a stabilization of the biol. The variability observed in SVT indicates an intermediate phase in the anaerobic digestion process. These findings highlight the importance of monitoring physicochemical parameters to optimize their compatibility with different soil types. For ST, SVT and SSF parameters, the NMX-AA-034-SCFI-2015 method was used and, for the determination of pH and EC, a potentiometer (Milwaukee pH-meter ref pH55) was used.

Keywords: Acetogenesis, Acidogenesis, Anaerobic digestion, Biogas, Hydrolysis, Liquid biofertilizer, Methanogenesis

INTRODUCCIÓN

Los biodigestores están considerados como una tecnología asequible en la agricultura, colaborando a la sustentabilidad, disminuyendo la deforestación, además, desempeña una función importante en el manejo apropiado de los residuos de origen animal, como las excretas (Neto & de Oliveira, 2022). Debido a que el inadecuado manejo de residuos está contemplado como un problema a nivel global, es de suma importancia adquirir nuevos métodos para gestionar los residuos de manera adecuada y, para ello, debe ser aceptado y tener una alta tasa de éxito (Issahaku, Derkyi, & Kemausuor, 2024). De la misma forma, dicha biotecnología anaeróbica resulta prometedora para recuperar el metano proveniente de los desechos de origen orgánico, con la intención de minimizar la dispersión de los gases de efecto invernadero (GEI) (Nuhu, Gyang, & Kwarbak, 2021). Los residuos de origen orgánico en un biodigestor se convierten en biogás, el cual puede emplearse para la cocina, el alumbrado y biofertilizante orgánico (Schoeber, Rahmann, & Freyer, 2021).

Definitivamente, la innovación de fuentes de energía, como la implementación de biodigestores, tiene la capacidad de generar una cantidad considerable de energía, además de reducir daños ambientales, sociales y económicos (Viegas, Guimaraes, Kuwano, de Oliveira, & Alves, 2023). La digestión anaerobia del estiércol de vaca y cerdo es una vía de valorización adecuada para este importante flujo de residuos (Pluschke et al., 2023). El biogás producido en el transcurso de la digestión anaerobia de los residuos agropecuarios resulta un sustituto óptimo para el uso persistente de la biomasa tradicional, utilizada habitualmente para la iluminación y la producción de calor. El empleo de dicho biogás, resulta benéfico para la eficiencia de las viviendas, reduciendo el impacto en el ambiente y disminuyendo considerablemente la dependencia a los agroquímicos y los combustibles tradicionales (Parra-Ortiz, Botero-Londoño, & Botero-Londoño, 2019). Así, la conversión de residuos en energía mediante digestión anaerobia es una opción prometedora. Por tal motivo, economistas energéticos, industrias y agencias buscan tecnologías de bajo costo como los

digestores de biogás para la generación de energía (Obileke, Makaka, Nwokolo, Meyer, & Mukumba, 2022).

México tiene el potencial de generar 1,649.5 m³ de biogás al año, equivalente a 2,327.3 GWh de electricidad por año, lo que resulta idóneo para suministrar a, aproximadamente, un millón de personas (Venegas-Venegas et al., 2023). La Comarca de la Laguna (CL), coloquialmente conocida como la Comarca Lagunera o La Laguna, ubicada en el noreste de México, dispone de una gran cantidad de granjas lecheras y comunidades ganaderas, únicamente en el año 2018, la CL reportó 1,163,046 rumiantes en inventario y, sólo estaban en producción 350,280 llegando a generar 2,503.50 millones de litros de leche (Navarrete-Molina, 2020). Con este contexto, la producción de biogás a partir de desechos agropecuarios, tal como el estiércol proveniente de animales, nos brinda un medio sustentable para la generación de energía renovable y lograr la mitigación de los GEI emitidos por el sector agrícola (Silva-González et al., 2021). El objetivo de este trabajo es evaluar cómo interactúan los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, sólidos totales, sólidos volátiles totales y sólidos suspendidos fijos) en la determinación de la calidad del biol bovino. La hipótesis de este trabajo es que, por lo menos una característica fisicoquímica del biol es afectada significativamente conforme avanza la producción de biogás, mientras que la pregunta de investigación es ¿cómo interactúan el pH, la conductividad eléctrica (CE), los sólidos totales (ST), los sólidos volátiles totales (SVT) y los sólidos suspendidos fijos (SSF) para determinar la calidad del biol?

REVISIÓN DE LITERATURA

Biodigestores

La escasez y el aumento de las tarifas de los suministros de petróleo se han encargado de impulsar a una gran cantidad de países a realizar estudios acerca del uso de fuentes de energía que sustituyan el uso común de combustibles provenientes de sistemas no renovables, de los cuales su declive está pronosticado para el siglo actual (Reyes-Aguilera, 2017). Aunado a lo anterior, el creciente aumento de la población y la propagación de la industria ocasionan un incremento en la demanda energética y un descenso en la calidad del medio ambiente (Arifin, Khoir, & Purwanto, 2020). Asimismo, el reciente incremento de los sistemas de producción ganaderos aumentó la urgencia de llevar a cabo el desarrollo de herramientas para la correcta manipulación de los residuos y la disminución de los impactos negativos en el medio ambiente, además de responder a las demandas de la población y los mercados, que cada día van en aumento y, también, dar cumplimiento a la reglamentación vigente (Rostagno, Castignani, Mansilla, Rossler, & Osan, 2020). Otra manera de que la ganadería resulte una práctica más sustentable es la crianza ecológica del ganado, no obstante, las actividades en la ganadería generan residuos indistintamente de la forma de cría. Independientemente del sistema de producción, se originan residuos que, por fortuna, son capaces de transformarse en un recurso energético a través de los biodigestores. Por consiguiente, tenemos que atender cuidadosamente la correcta disposición de la biomasa animal que se genera, debido al vertido intenso de nutrientes, materia orgánica y gases de efecto invernadero que pueden afectar el medio ambiente (Paes, Alves, da Silva, Marques, & Dias, 2020). Ahora bien, el incremento en la producción de residuos de origen orgánico se relaciona con el aumento de la población y la calidad de vida en los asentamientos urbanos, lo que ha ocasionado el uso de tecnologías adecuadas para que los residuos orgánicos tengan una correcta disposición final y que ayuden la disminución de los impactos ocasionados por dichos residuos, sin llegar a perjudicar el medio ambiente y la salud de la población (Morales, Vega, Vanegas, Ortega, & Vanegas, 2023).

Una alternativa viable a lo que se menciona en el párrafo anterior son los biodigestores, que se manifiestan como una tecnología factible en el entorno ganadero y agrícola para el tratamiento y la digestión anaerobia de la materia orgánica que se encuentra en los residuos alimentarios, vegetales y de estiércol de origen animal, susceptibles a desarrollar dicha transformación. Generalmente, los biodigestores son definidos como contenedores herméticos y adiabáticos, hecho con materiales propician el proceso de la digestión anaerobia que llevan a cabo las poblaciones microbianas responsables de la descomposición de la materia orgánica a través de cuatro etapas primordiales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y, por último, la metanogénesis (Granados-Moreno, Abril-Herrera, & Mogollón-Reina, 2022).

Recientemente, los biodigestores han atraído mucha atención como alternativa eficaz para la generación de energía y el tratamiento de residuos orgánicos. El rendimiento final de un biodigestor depende en gran medida de la calidad de su proceso constructivo y de la selección de su materia prima (Camarena-Martinez, Lizarraga-Morales, & Baeza-Serrato, 2021).

Función de los biodigestores

Los biodigestores están diseñados para optimizar la producción de biogás, además de otros subproductos, como el biol a partir de residuos orgánicos, obteniendo así energía renovable limpia y de bajo coste.

Los biodigestores están hechos para mejorar la generación de biogás, así como otros subproductos, como el biol, a partir de los residuos orgánicos, logrando así, energía renovable limpia y económica (Rivas-Solano, Faith-Vargas, & Guillén-Watson, 2016). El biogás producido con residuos orgánicos agrícolas resulta conveniente y considerado con el clima, además de que el biol se puede utilizar como un excelente biofertilizante para los cultivos. Esta práctica es favorable para el medio ambiente, debido a que genera una economía circular y captura gases que pueden llegar a deteriorar la capa de ozono (metano y dióxido de carbono o CO₂) (Odega, Ayodele, Alagbe, Adewole, & Adekunle, 2022).

Clasificación de los biodigestores

De acuerdo a la frecuencia de carga orgánica, se clasifican en:

Continuo: es comúnmente utilizado para el saneamiento de las aguas residuales o la digestión de las excretas de origen animal. Se distingue por su gran capacidad (más de 6 m³) y, la carga orgánica es altamente diluida en agua. (Ortega-Bucio, Hernández-Hernández, & Zea-Pérez, 2019).

Semicontinuo: la generación de biol por medio de este tipo de biodigestores es la forma más eficiente y breve para obtenerlo, esto se debe a que, tanto el ensamble como el manejo son simples. El proceso biológico de digestión anaerobia hace uso de microorganismos que cumplen la función de degradar la materia orgánica en ausencia de oxígeno, además, produce biogás y tiene otros subproductos (biol y biosol) que se pueden emplear como fertilizantes orgánicos en la agricultura (Arguelles, Pintor, Mesinas, Márquez, & Becerra, 2023). A continuación, algunos ejemplos de biodigestores semicontinuos:

- **Biodigestor de tipo salchicha:** este tipo de biodigestor se caracteriza por su forma tubular alargada, similar a una salchicha, hacer uso de esta clase de biodigestor tiene algunas ventajas, como una instalación sencilla, además de que es económico y conveniente para la disposición final de los residuos del faenamiento del ganado bovino. Aunado a lo anterior, también se alinean a los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) 3 y 7 de las Naciones Unidas (Reascos, Alvarez, Villarruel, & Coyago, 2022).
- **Biodigestores de domo fijo:** este tipo de biodigestor se caracteriza por tener una estructura rígida, generalmente construida con materiales como ladrillos, piedra u hormigón (Cardozo, 2019), además su tiempo de vida útil suele ser de entre 15 y 20 años (Ortiz, Botero-Londoño, & Botero-Londoño, 2019).
- **Biodigestor de domo flotante:** también conocido como biodigestor de tambor flotante, se distingue porque cuenta con un tambor o cúpula

que flota por encima de la mezcla en fermentación, adaptándose al volumen del biogás que se generó. Además, posee un tambor metálico que rebasa la superficie de la tierra y cambia de posición conforme al volumen del biogás producido. También, según el peso que ejerce el tambor o las masas agregadas, se mantiene una presión constante en el biogás (Ortiz et al., 2019).

Discontinuo: también conocido como biodigestor por lotes o “batch”, en este biodigestor, las materias primas se añaden al principio del proceso y se mantienen cubiertas durante un periodo determinado. El biodigestor se vacía antes de añadir el siguiente lote de materias primas. El funcionamiento y el mantenimiento de un digestor discontinuo son sencillos, pero la producción de biogás es periódica (Uddin & Wright, 2023).

Digestión anaerobia

Los residuos de los alimentos cuentan con una gran cantidad de nutrientes y se han transformado en un excelente sustrato para la recuperación de bioenergía con la ayuda de la digestión anaerobia (DA) (Khune, Otieno, Kabuba, Ochieng, & Osifo, 2023). La utilización de los residuos agrícolas durante la DA para producir biogás proporciona beneficios medioambientales y socioeconómicos (Paes, Costa, Fernandes, Vargas, & Cecchin, 2023). A su vez, la DA transforma los compuestos complejos en simples, resultando así en la liberación de una mezcla de gases (Andrade, Restrepo, & Tibaquirá, 2018). Cabe destacar que esta técnica es una de las más prósperas en cuanto a la transformación de energía se refiere, ya que convierte los residuos orgánicos en biogás, un combustible gaseoso útil. Durante este proceso se genera metano gracias a los metanógenos (bacterias). La subsistencia y la acción de dichos metanógenos dependen de ciertos parámetros, tales como el pH, la temperatura, la carga orgánica y la clase de biodigestor. Aunado a ello, estos parámetros contribuyen a la generación del biogás en cuanto a rendimiento y composición. Es importante considerar que, el

mantenimiento de una temperatura apropiada para la DA es primordial y precisa de bastante energía (Kalaiselvan et al., 2022). La DA tiene la capacidad de disminuir la contaminación proveniente del sector agrícola porque convierte el carbono y algunos nutrientes presentes en el estiércol en productos beneficiosos (DeCola et al., 2024).

Proceso de digestión anaerobia

La DA es un proceso natural y bioquímico por medio del cual los materiales complejos de origen orgánico se desdoblán por acción de algunas comunidades microbianas para producir biogás y biomoléculas elementales, anaeróticamente (Granados, Abril, & Mogollón, 2022). Este proceso posibilita que en el interior del biodigestor se lleven a cabo un conjunto de reacciones bioquímicas, en las cuales y, conforme a ciertos parámetros, como la temperatura y el pH, diversos microorganismos se encargan de descomponer la materia orgánica, transformándola en biogás, además de biol (Britto, Cotes, & Rudas, 2023). Cabe destacar que los sistemas que llevan a cabo la DA han destacado en la comunidad científica debido a los beneficios que les proporcionan, tanto al medio ambiente y la salud, como a la energía y la economía (Van, Fujiwara, Tho, Toan, & Minh, 2020). El proceso de DA se produce en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Duarte et al., 2023), las cuales se describen a continuación:

- **Hidrólisis**

Es el primer paso en la DA, que se encuentra limitada en cuanto a sustratos sólidos y, a su vez, su tasa de degradación se ve afectada por la hidrólisis, ya que, cuando se refiere a sustratos sólidos, es un paso especialmente lento. En esta fase, la materia orgánica compleja, como las proteínas, los lípidos y los hidratos de carbono, comienzan a solubilizarse en materia simple, como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos (Cano, Nielfa, & Fdz-Polanco, 2014).

- **Acidogénesis**

Algunas bacterias facultativas anaeróbicas y bacterias obligadas absorben los monómeros que se generaron en la fase anterior, además, llegan a degradarse

todavía más en ácidos orgánicos de cadena corta (ácidos acéticos, alcoholes, ácidos butíricos, CO_2 , hidrógeno, y ácidos propanoicos) (Adekunle & Okolie, 2015).

- **Acetogénesis**

Es la tercer fase de la DA, en donde se transforma gran parte de la fase anterior en ácido acético (CH_3COOH), hidrógeno (H_2) y CO_2 (Van et al., 2020).

- **Metanogénesis**

La producción de metano partiendo de residuos orgánicos contribuye a darle cumplimiento a la demanda energética además de favorecer algunos aspectos ambientales, como la atenuación de la contaminación y del cambio climático. Los residuos de origen orgánico que son empleados en su elaboración, no presentan diferencias significativas con respecto a los del hidrógeno. Es importante destacar que, cuando se genera el metano, puede ser utilizado como combustible para transporte, energía eléctrica y calefacción (Álvarez-Valencia, 2024).

Condiciones operativas

La calidad de la materia prima, el tratamiento previo, el diseño y la elección del proceso de digestión, así como las condiciones del mismo (Zamri et al., 2021), son elementos fundamentales que podrían perjudicar la efectividad de la DA, además de ciertas variables operacionales, como la relación carbono/nitrógeno (C/N), temperatura, sustrato, sólidos totales (ST), tiempo de retención hidráulico (TRH) y pH (Singh, Szamosi, & Siménfalvi, 2020).

- **Temperatura**

Este parámetro es fundamental, puesto que precisa la estabilidad termodinámica en las reacciones bioquímicas (Gómez-Muñoz et al., 2024). La temperatura afecta directamente las características fisicoquímicas de cada uno de los componentes del biodigestor, además, influye en la termodinámica y la cinética de los procesos biológicos. Dicho parámetro establece si una reacción resulta beneficiosa, por ende, también tiene un efecto sobre la generación de metano (Boe, 2006).

- **Potencial de hidrógeno (pH)**

El pH funciona como determinante para el equilibrio del sistema (Gómez-Muñoz et al., 2024). Por lo anterior, es importante destacar que las bacterias encargadas de generar metano funcionan activamente en un rango de pH entre 6.5 y 8. No obstante, se ha informado que, tanto para la hidrólisis como para la acidogénesis, los rangos óptimos de funcionamiento son entre 5.5 y 6.5, aunque, la DA también se puede ejecutar con un pH neutro (Sibiya, Muzenda, & Tesfagiorgis, 2014).

- **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)**

El TRH plasma el promedio del tiempo que la materia prima se mantendrá en el digestor (Gómez-Muñoz et al., 2024). La DA de las excretas de ganado presenta una deficiencia a causa del elevado TRH que se requiere para degradar los materiales que se resisten a la degradación, los cuales resultan numerosos. Por otra parte, la codigestión de las excretas de ganado con otros materiales orgánicos que, por el contrario, son de fácil degradación, funciona como una solución apropiada para este inconveniente (Bi et al., 2020).

- **Relación carbono-nitrógeno (C/N)**

La porción de carbono y nitrógeno que existe en la materia orgánica puede ser descrita gracias a la relación C/N. Este parámetro es un factor fundamental en los procesos biológicos, donde el carbono funge como una fuente de energía, mientras que el nitrógeno contribuye a la formación de la estructura de la célula (Gómez-Muñoz et al., 2024). Durante este proceso, los microorganismos requieren carbono en una proporción de 25 a 30 veces superior a las que necesita el nitrógeno. Por tal motivo, para optimizar la DA es conveniente que la materia prima presente una relación C/N en un rango de 25:1 a 30:1, con un contenido de materia seca comprendido entre el 7 y el 10 % (Tangwe, Mukumba, & Makaka, 2022).

Productos obtenidos a partir del biodigestor

Biogás

El estiércol bovino, comúnmente empleado como fertilizante, posee un alto potencial energético mediante la producción de biogás, lo que representa una alternativa interesante frente a los desafíos relacionados con la generación y el costo de la energía a nivel global actualmente (Mayans et al., 2023). El biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, se obtiene a través de la digestión anaerobia de materia orgánica por la acción de microorganismos. Su aprovechamiento permite la generación de calor, electricidad o incluso su uso como biocombustible para el transporte, reduciendo la dependencia a los combustibles fósiles y colaborando para la transición hacia un modelo energético más sostenible. En un contexto de creciente preocupación ambiental y aumento de la demanda energética, el biogás se perfila como una solución prometedora para mitigar el impacto ambiental y fortalecer la seguridad energética (Yamaji, Amâncio-Vieira, Fidelis, & Contani, 2024).

La obtención de biogás es un proceso natural que ocurre espontáneamente en ambientes anaeróbicos, lo que significa que es en ausencia de oxígeno. Este fenómeno se lleva a cabo debido a la actividad de diversos microorganismos que se encargan de descomponer la materia orgánica durante la DA, produciendo biogás como subproducto (Rivas-Solano et al., 2016). En el campo de la ganadería, el aprovechamiento de este recurso representa una alternativa energética limpia y económica, posibilitándole a los productores incrementar sus ingresos, además de descentralizar el acceso a la energía y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Asimismo, su implementación se encarga de optimizar el uso de los recursos disponibles y favorecer el ahorro en los procesos productivos a largo plazo (Granados-Moreno et al., 2022).

Este subproducto, resultado de la descomposición de residuos orgánicos, manifiesta una solución integral que enfrenta varios desafíos, entre los que se encuentran la gestión eficiente de residuos, la diversificación de las fuentes energéticas y el impulso del desarrollo sustentable. Sintetizando lo anterior, su

producción, además de optimizar el manejo de residuos, también contribuye al desarrollo sustentable (Yamaji et al., 2024).

Composición del biogás

El biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) (González, Parralejo, Gozález, Alvarez, & Sabio, 2022).

Biol

Frente a la creciente demanda de fuentes energéticas alternativas y fertilizantes sostenibles, la DA se presenta como un proceso fundamental que, no sólo permite la producción de biogás, sino también la obtención de biol, un fertilizante orgánico de alto valor agronómico (Czekala, 2022). Este subproducto, rico en nutrientes esenciales, como el nitrógeno, se obtiene por medio de la fermentación del estiércol en condiciones anaerobias, lo que favorece su implementación en la agricultura, especialmente en cultivos orgánicos (N. A. Torres et al., 2020). Su composición, además de aportar macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K), incluye micronutrientes de fácil asimilación y hormonas de crecimiento, promoviendo el desarrollo de las plantas (Reynoso, 2020). El uso de fertilizantes de origen orgánico, como el biol, no solamente colabora en la reducción de costos asociados al consumo de agroquímicos y fertilizantes sintéticos, sino que también permite el aprovechamiento de residuos orgánicos que son considerados como una fuente de contaminación. Además, su aplicación mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, incrementando su fertilidad (Cabos-Sánchez, Bardales-Vásquez, León-Torres, & Gil-Ramírez, 2019). En este contexto, su importancia es aún más relevante en países en desarrollo, donde los fertilizantes sintéticos suelen ser costosos y el reciclaje de nutrientes a partir de fuentes orgánicas se vuelve una estrategia esencial para la sostenibilidad agrícola (Odales, López, López, Jiménez, & Barrera, 2020).

Proceso de producción del biol

El biol se obtiene a través de la degradación anaerobia del estiércol en el interior del biodigestor, un proceso en el que intervienen microorganismos cuya actividad está influenciada por la temperatura de operación. La eficiencia de esta transformación depende, además, del tiempo de retención del material en el sistema, facilitando la descomposición y transformación del estiércol biol (Merino, Rojas, & Herrera, 2020).

Composición química del biol

- **Nutrientes**

Las propiedades de los fertilizantes orgánicos, como el biol, varían en función de ciertos factores, entre los cuales destacan la clase de estiércol empleado y el grado de dilución. En este sentido, los fertilizantes generados a partir de un biodigestor que procesa estiércol bovino o porcino presentan una composición promedio de 2 a 3 % de nitrógeno, 1 a 2 % de fósforo, 1 % de potasio y aproximadamente un 85 % de materia orgánica (Cabos-Sánchez et al., 2019).

- **Microorganismos benéficos**

El biol está compuesto por una variedad de microorganismos benéficos, entre los que se incluyen bacterias anaeróbicas, mohos, levaduras y bacterias ácido-lácticas. La presencia en altas concentraciones de estos microorganismos acelera la descomposición del sustrato (A. Torres, Quipuzco, & Meza, 2015).

Ventajas del uso del biol

- **Beneficios para los cultivos y suelos**

El biol se presenta como una tecnología alternativa de naturaleza orgánica diseñada para optimizar la productividad de los cultivos (Gil Ramírez et al., 2022). Entre sus principales beneficios se encuentra la mejora de la fertilidad del suelo, el crecimiento acelerado y desarrollo más rápido de las plantas, el fortalecimiento de su resistencia ante plagas y enfermedades, así como una mayor tolerancia a

condiciones climáticas desfavorables, como heladas y granizadas y potenciar los recursos naturales del suelo (Ramírez, Cabrera, Escobedo, Vásquez, & Torres, 2023).

- **Comparación con fertilizantes químicos**

El empleo del biol como fertilizante se ha convertido en una práctica cada vez más frecuente entre los agricultores, quienes buscan sustituir los fertilizantes químicos, conocidos por su toxicidad y efecto contaminante, por alternativas orgánicas más sostenibles. Este biofertilizante no solo suministra micro y macronutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos, sino que también aporta materia orgánica estabilizada (Velásquez-Piñas, Calle-Roalcaba, Miramontes-Martínez, & Alonso-Gómez, 2023). La aplicación de biol en los cultivos implica un proceso de reciclaje de nutrientes, lo que otorga al productor una mayor resiliencia e independencia frente al uso de productos químicos externos a dichos cultivos. Su utilización no sólo permite fertilizar los campos de manera más económica, al reducir la necesidad de fertilizantes sintéticos, sino que también añade un valor significativo a la producción (Osorio, Carrera, Bonilla, & Salazar, 2023). Otra manera de conseguir beneficios del biol puede ser mediante la venta directamente a los productores rurales (Velásquez-Piñas et al., 2023).

- **Reducción de residuos orgánicos**

La construcción de biodigestores permite desarrollar estrategias para el aprovechamiento de residuos orgánicos, generando beneficios como el biol, que puede ser utilizado en los cultivos. Tradicionalmente, el estiércol se desechaba, pero gracias a estas tecnologías ecológicas innovadoras, se minimizan los impactos ambientales. Por lo tanto, este subproducto puede ser transformado en un excelente fertilizante orgánico (Ávila, Salazar, & Calvo, 2020).

Efectos en el suelo

- **Mejoras en la estructura y retención de agua del suelo**

El uso habitual de abonos orgánicos en los suelos agrícolas incrementa gradualmente el contenido de materia orgánica, lo que, a su vez, mejora la

disponibilidad de nutrientes a mediano y largo plazo (Macías Duarte, Grijalva Contreras, Robles Contreras, López Carvajal, & Núñez Ramírez, 2020).

- **Incremento de la actividad microbiana**

La degradación de la materia orgánica del suelo (MOS) es un proceso natural llevado a cabo por microorganismos heterotróficos, cuya velocidad de descomposición refleja generalmente el grado de actividad microbiana en el suelo. La adición de materia orgánica, como el biol, puede incrementar la biomasa microbiana, lo que contribuye a mejorar la fertilidad del suelo (Paolini Gómez, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en el laboratorio de Química del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) - Unidad Laguna, con coordenadas 25°33'24.6"N 103°22'30.6"W, durante el segundo semestre del año 2024, con el objetivo de llevar a cabo un manejo sustentable de los residuos agropecuarios mediante el desarrollo de un biodigestor, del cual se obtiene el biol.

Características del biodigestor

El biodigestor es tubular y, tal como se muestra en la Figura 1, tiene un volumen total de 6.5 m^3 , compuesto por un volumen de operación de 5 m^3 para líquidos y un volumen gaseoso de 1.5 m^3 . La fosa correspondiente presenta dimensiones de 5 metros de largo, 1.2 metros de ancho en la parte superior, 0.18 metros de ancho en la parte inferior y 1 metro de profundidad. Los componentes principales para el biodigestor (estiércol y agua), se colocaron en proporciones concretas: 42 kg de estiércol y 125 litros de agua diarios. Esta relación se determinó con la finalidad de conseguir una estabilidad óptima para la actividad microbiana dentro del biodigestor.

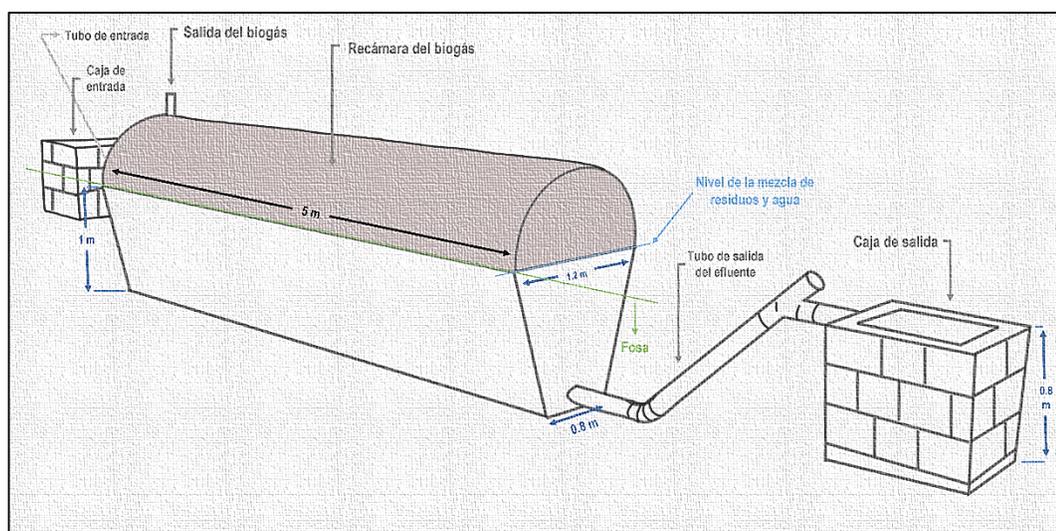


Figura 1. Elaboración propia. Diagrama del biodigestor ubicado en la UAAAN-UL.

Metodología para la obtención de parámetros

Para la caracterización del biol en el laboratorio, fueron tomadas del biodigestor 8 muestras (Figura 2) de 500 ml cada 15 días durante un mes, la primera extracción se realizó el 14 de mayo del 2024, posteriormente, la segunda fue realizada el 29 de mayo y, la última, fue tomada el 13 de junio del 2024. De las 24 muestras se emplearon 25 ml para elaborar 2 repeticiones en su respectivo día de recolección para analizar el pH, la CE, los ST, SVT y SSF, de los cuales se describen los procedimientos a continuación:



Figura 3. Recolección de biol en el biodigestor (UAAAN-UL).



Figura 2. Muestras de biol en el laboratorio.

pH y conductividad eléctrica (CE)

Procedimiento:

Para el pH se comienza calibrando el potenciómetro modelo pH-metro ref pH55 de la marca Milwaukee a temperatura ambiente, utilizando soluciones amortiguadoras de pH 4, 7 y 10, siguiendo estrictamente el protocolo de calibración establecido por el potenciómetro. Para la CE se utilizó un conductímetro modelo TDS&EC Meter Hold de la marca Tbest previamente calibrado según el protocolo establecido en su manual. Una vez completado lo anterior, los electrodos del potenciómetro y del conductímetro se enjuagan cuidadosamente para eliminar cualquier residuo y, a continuación, se sumergen en un vaso de precipitado de 150 ml con agua destilada, donde permanecen

hasta el momento de su uso. Tras finalizar la calibración, se procede a medir la solución problema. En este paso, se determina tanto el pH como la conductividad eléctrica, sumergiendo los electrodos en las muestras (Figuras 4 y 5) y esperando a que los equipos confirmen que las lecturas se han realizado correctamente. Cabe destacar que, después de cada medición, es importante enjuagar los electrodos con agua destilada proveniente de una pizeta de 250 ml.



Figura 4. Potenciómetro sumergido en una muestra de biol.



Figura 5. Conductímetro sumergido en una muestra de biol.

Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT) y sólidos suspendidos fijos (SSF)

El análisis de ST, SVT y SSF se realizó siguiendo la metodología establecida en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2015), ajustando el volumen de las muestras según las capacidades del equipo disponible.

Procedimiento:

Se inició preparando las cápsulas y crisoles de porcelana, las cuales fueron introducidas en un horno de secado modelo AR-290 marca Felisa (Figura 6) a 100 °C durante 30 minutos. Posteriormente, se trasladaron a una mufla modelo FE340 de la marca Felisa a 600 °C (Figura 7) durante otros 30 minutos. Una vez

finalizado este proceso, se enfriaron las cápsulas y se pesaron en una balanza analítica Pioneer Analytical PX224 marca Ohaus (Figura 8), hasta alcanzar un peso constante, obteniendo el valor designado como (A).



Figura 6. Cápsulas y crisoles de porcelana dentro del horno.



Figura 4. Mufla a 600 ° C para la introducción de muestras.



Figura 8. Proceso de pesado de cápsulas y crisoles en la balanza analítica.

A continuación, se tomaron alícuotas de 25 ml de las 8 muestras (Figura 9) utilizando una pipeta volumétrica de dicha capacidad y se vaciaron cuidadosamente en las cápsulas de porcelana preparadas, dicha cantidad de muestra fue considerada en función del tamaño de la cápsula de porcelana.

Las muestras se colocaron en el horno de secado a 103 °C durante, aproximadamente, ocho horas, hasta que se evaporaron completamente. Tras finalizar la evaporación, se enfriaron en un desecador y se llevaron nuevamente a peso constante, obteniendo así el valor denominado (B).

Para determinar los sólidos volátiles, los residuos resultantes de la evaporación de las muestras se calcinaron a 550 °C en la mufla durante un periodo aproximado de siete horas. Una vez completada la calcinación, los residuos se enfriaron en el desecador y se pesaron, obteniendo finalmente las cenizas (Figura 11), valor designado como (C).



Figura 7. Alícuotas de las muestras de biol.



Figura 6. Muestras evaporadas en el horno de secado.

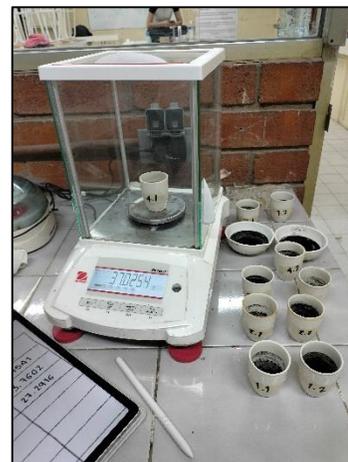


Figura 5. Obtención del peso de las cenizas en la balanza analítica.

Cálculos

El peso de la cápsula después de evaporar la muestra (B) menos el peso de la cápsula (A) es igual al peso en gramos de los ST.

$$E = \text{ppm de Sólidos Totales (ST)} = \frac{(B - A)1 \cdot 10^6}{\text{ml de muestra}}$$

Ecuación 12. Ecuación para obtener los ST en ppm.

El peso de la cápsula después de la evaporación de la muestra (B) menos el peso de la cápsula después de la calcinación (C), es igual a los SVT.

$$F = \text{ppm de Sólidos Volátiles Totales (SVT)} = \frac{(B - C)1 \cdot 10^6}{\text{ml de muestra}}$$

Ecuación 2. Ecuación para obtener los SVT en ppm.

Con las concentraciones en ppm de ST, menos la de SVT, se determinan las ppm de SSF.

$$\text{ppm de Sólidos Suspendidos Fijos} = E - F$$

Ecuación 3. Ecuación para obtener los SSF en ppm.

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos de las mediciones de pH, Conductividad Eléctrica (CE) y sólidos (ST, SVT, SSF) fueron procesados y analizados utilizando métodos estadísticos descriptivos y comparativos. Todas las pruebas se realizaron en el software RStudio (versión 4.4.2.) y los resultados se interpretaron con un nivel de significancia del 95 % ($p < 0.05$).

Estadística Descriptiva

Se calcularon estadísticos descriptivos, como la media, desviación estándar (SD) y coeficiente de variación (CV), para evaluar la distribución de los valores de pH, CE, ST, SVT y SSF en cada una de las fechas de muestreo (14/05/2024, 29/05/2024 y 13/06/2024) y entre las repeticiones. Esto posibilitó la identificación de la consistencia de las mediciones además de la observación de las tendencias generales a lo largo del tiempo.

Para las mediciones de pH y CE, la media y SD fueron calculadas agrupando las muestras por fecha, mientras que el CV se utilizó para evaluar la variabilidad relativa de los datos, calculado como $CV = (SD/Media) \times 100$.

De manera similar, para los ST, SVT y SSF, se calcularon medias, SD y CV por fecha. Esto permitió evaluar la variabilidad y estabilidad del biol a lo largo del tiempo. Los resultados fueron tabulados y representados gráficamente en gráficos de tendencias y boxplots.

Comparación de Fechas

Para determinar diferencias significativas entre las fechas de muestreo, se realizó una evaluación de la distribución de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Esta prueba indicó que las variables pH ($p = 0.00000137$) y CE ($p = 0.000217$) no seguían una distribución normal ($p < 0.05$), por lo que se utilizaron pruebas no paramétricas para los análisis comparativos.

De manera similar, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a las variables ST, SVT y SSF, observándose que tampoco presentaban una distribución normal. En consecuencia, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar si existían diferencias significativas entre las fechas de muestreo en cada una de las variables analizadas. Posteriormente, se aplicaron pruebas post hoc de Dunn, con corrección de Bonferroni, para identificar entre qué pares de fechas se encontraban estas diferencias.

Análisis de Correlación

Para evaluar la relación entre el pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en las muestras de biol, se realizó un análisis de correlación no paramétrica mediante el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), dado que las pruebas de normalidad realizadas previamente (Shapiro-Wilk) indicaron que ambas variables no seguían una distribución normal ($p < 0.05$).

El análisis se llevó a cabo en RStudio (versión 4.4.2) utilizando la función `cor.test` con el método de Spearman. El coeficiente de correlación obtenido fue $\rho = 0.47$, con un p-valor de 0.0007485, lo que indica una correlación positiva moderada y significativa entre el pH y la CE en el biol analizado.

Software y Visualización

Los gráficos de tendencias y los análisis estadísticos fueron generados en RStudio. Los promedios de pH, CE, ST, SVT y SSF por fecha se representaron en gráficos de líneas con barras de error, resaltando las diferencias significativas obtenidas mediante las pruebas de Dunn. Adicionalmente, se generaron boxplots para visualizar la distribución de los datos y su variabilidad entre fechas y repeticiones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó en el apartado de metodología para la obtención de parámetros de la sección de materiales y métodos, el 14/05/2024, 28/05/2024 y el 13/06/2024 fueron tomadas del biodigestor 8 muestras de biol para elaborar 2 repeticiones de cada muestra en su respectivo día de recolección, las cuales fueron utilizadas para analizar los siguientes parámetros:

pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Se tomaron 8 muestras de 500 ml del biol proveniente del biodigestor, de las cuales se utilizaron 25 ml para las 2 repeticiones de cada muestra para la determinación del pH y CE. El pH promedio se mantuvo entre 7.2 y 9.3, presentando el valor más alto (9.3) el 13/06/2024. En cambio, la desviación estándar del pH es muy baja (prácticamente cero en la mayoría de los casos) Por otro lado, los valores promedio de la CE varían entre 5542 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 13200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el valor más alto (13200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se registró también el 13/06/2024. Ahora, la desviación estándar para la CE es moderada (algunos valores entre 80 y 494). Los resultados de las pruebas de Dunn para el pH y la CE muestran diferencias significativas entre las fechas analizadas. A continuación, está el desglose:

Tabla 1. Resultados de las pruebas de Dunn para el pH.

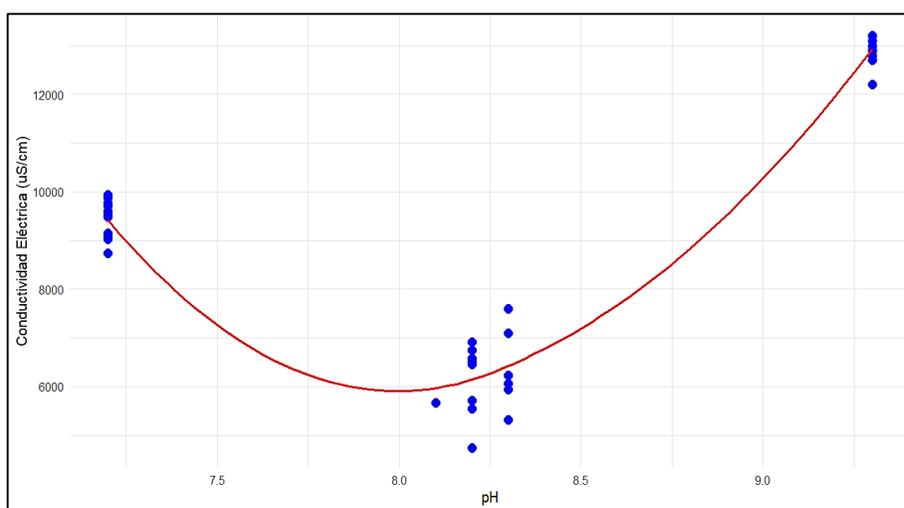
pH			
Diferencias	Estadístico	p-valor ajustado	Interpretación
14/05/24 vs. 29/05/24	-3.37	0.00222 (significativo)	Hay una disminución significativa en los valores de pH entre estas fechas.
14/05/24 vs. 13/06/24	3.37	0.00222 (significativo)	Hay un aumento significativo en los valores de pH entre estas fechas.
29/05/24 vs. 13/06/24	6.75	4.48e-11 (muy significativo)	El pH aumentó significativamente de la segunda a la tercera fecha.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de Dunn para la CE.

CE			
Diferencias	Estadístico	p-valor ajustado	Interpretación
14/05/24 vs. 29/05/24	3.24	0.00361 (significativo)	La CE aumentó significativamente entre estas dos fechas.
14/05/24 vs. 13/06/24	6.48	2.81e-10 (muy significativo)	La CE aumentó drásticamente entre estas fechas.
29/05/24 vs. 13/06/24	3.24	0.00361 (significativo)	La CE continuó aumentando de la segunda a la tercera fecha.

Correlación entre pH y CE

Los resultados esperados se analizaron con el coeficiente de Spearman (ρ) que, en este caso, indica la fuerza y dirección de la relación entre pH y CE, en donde $\rho > 0$ es una relación positiva y nos dice que, a medida que aumenta el pH, aumenta la CE. Por otro lado, si $\rho < 0$ la relación es negativa, lo que significa que, a medida que aumenta el pH, disminuye la CE. Ahora bien, si el p valor < 0.05 , la correlación es estadísticamente significativa. El coeficiente de correlación (ρ) que se obtuvo fue de 0.47 y un p valor de 0.0007485.

**Figura 12.** Relación entre el pH y la CE (Spearman).

Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles Totales (SVT) y Sólidos Suspendidos Fijos (SSF)

El análisis de ST, SVT y SSF se realizó siguiendo la metodología establecida en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2015), ajustando el volumen de las muestras según las capacidades del equipo disponible. Al igual que en con el pH y la CE, se tomaron 8 muestras de 500 ml del biol proveniente del biodigestor, de las cuales se utilizaron 25 ml para las 2 repeticiones de cada muestra para la determinación sólidos.

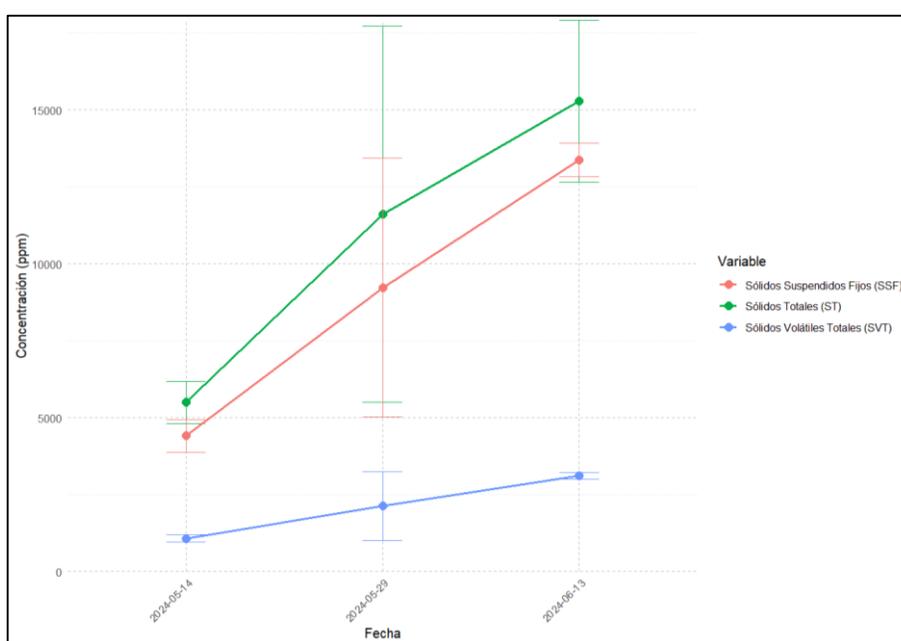
Los valores promedio de ST aumentaron desde 5493 ppm en la primera fecha (14/05/2024) hasta 15288 ppm en la última fecha (13/06/2024). Se observó una mayor variabilidad en la segunda fecha (29/05/2024), con una desviación estándar de 6112 ppm y un coeficiente de variación de 52.6. En contraste, en la última fecha, la variabilidad se redujo (SD = 2639 ppm, CV = 17.3 %).

En el caso de los SVT, se observó un comportamiento similar, con un incremento desde 1075 ppm en la primera fecha hasta 3107 ppm en la última. Al igual que en los ST, la mayor variabilidad se presentó en la segunda fecha (SD = 1111 ppm, CV = 52.3 %), mientras que en la última fecha los valores se estabilizaron con una desviación estándar baja (SD = 106 ppm, CV = 3.4 %).

Por otro lado, los SSF también mostraron un incremento notable, pasando de 4413 ppm en la primera fecha a 13381 ppm en la última. Al igual que en las otras variables, la mayor variabilidad se presentó en la segunda fecha (SD = 4213 ppm, CV = 45.6 %), mientras que en la última fecha los valores fueron más homogéneos (SD = 545 ppm, CV = 4.07 %).

Tabla 3. Promedio de sólidos (ST, SVT y SSF) con Desviación Estándar.

Fecha	Media ST	SD ST	Media SVT	SD SVT	Media SSF	SD SSF
5/14/2024	5492.75	689.954153	1075.125	121.12356	4412.625	533.090471
5/29/2024	11613.375	6111.92407	2123.8125	1110.86682	9231.5	4213.20885
6/13/2024	15287.75	2639.30323	3107.25	105.516823	13380.75	544.833124

**Figura 13.** Promedio de sólidos (ST, SVT y SSF) con Desviación Estándar.

Las pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis confirmaron que existen diferencias significativas en los valores de ST ($X^2=25.763$, $p=2.545 \times 10^{-6}$), SVT ($X^2=19.058$, $p=7.273 \times 10^{-5}$) y SSF ($X^2=33.006$, $p=6.806 \times 10^{-8}$) entre las fechas evaluadas.

Tabla 4. Chi cuadrado y valor P de los sólidos (ST, SVT y SSF).

Variable	Chi cuadrado	Valor P
ST	25.7628909	2.54E-06
SVT	19.0576273	7.27E-05
SSF	33.0057398	6.81E-08

El pH es la medida de acidez y alcalinidad presente en una solución, tiene como base la concentración de iones de hidrógeno (H⁺) y se representa en una escala del 0 al 14, en donde pH < 7 es ácido, pH = 7 es neutro y pH > 7 es básico o alcalino. Este parámetro es relevante debido a que es capaz de afectar el desarrollo de las plantas. En una mezcla de biol con una formulación tradicional (40 kg de estiércol de ganado vacuno y 120 litros de agua), la aproximación del pH hacia niveles neutros representa un avance significativo, ya que un pH más equilibrado es menos probable que altere la química del suelo cuando se aplica el biol como bioestimulante (Manzano, Ortega, & Arias, 2024). En el biodigestor presente en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Unidad Laguna (UAAAN-UL), se observaron niveles de pH de 8.2, 7.2 y 9.3, para la primera, segunda y tercera fecha, respectivamente. El nivel de pH reportado en la segunda fecha resulta óptimo para aplicaciones agrícolas, puesto que, un pH neutro es preferible para la mayoría de los cultivos, permitiendo una mejor disponibilidad de nutrientes en el suelo y evitando la alteración de las características fisicoquímicas del mismo (Manzano et al., 2024). Generalmente, los microorganismos anaerobios, incluidas las bacterias metanogénicas, tienden a desarrollarse mejor en un pH que oscila entre 6.5 y 8.5, por lo tanto, los niveles de la primera y segunda fecha resultan favorables. En cambio, un pH que se sitúa fuera de este intervalo puede suprimir la actividad microbiana y tener un impacto adverso en la producción de biogás (Soto, Avilés, Brígido, & Escobosa, 2024), como el valor reportado en la tercera fecha.

Los valores promedio de la CE en este estudio fueron de 6228.625 $\mu\text{S/cm}$ (6.23 mS/cm), 9417.75 $\mu\text{S/cm}$ (9.42 mS/cm) y 12950 $\mu\text{S/cm}$ (12.95 mS/cm) para la primera, segunda y tercera fecha de recolección, respectivamente. Estos valores son inferiores a los 16.32 mS/cm reportados por Gil Ramírez et al. (2022), quien menciona que, debido a esta característica, se puede emplear en suelos de baja salinidad o para la siembra de ciertas plantas con resistencia a esta propiedad. Cano Hernández (2016) reportó valores de 8.94 ± 2.8 y 8.4 ± 2.71 mS/cm, que resultan superiores a los de este estudio y, también señala que la CE en suelos muy salinos se encuentra en un rango de 8 a 16 mS/cm, lo que sugiere que su biol es adecuado para su aplicación en suelos con baja salinidad o en cultivos resistentes a estas condiciones, situación para la que también aplica el biol de la segunda y tercera fecha. Respecto a la primera fecha, que tiene niveles de CE menores a la segunda y tercera, considerando la desviación estándar reportada por el último autor, algunas muestras podrían haber presentado valores de CE aproximados a 6 mS/cm. En este contexto, el biol recolectado durante las tres fechas de extracción cumple con las condiciones propuestas por ambos autores, lo que indica que es adecuado para aplicaciones agrícolas, especialmente en suelos de baja salinidad o en cultivos resistentes.

Los incrementos de pH y CE a lo largo del tiempo podrían estar relacionados con la estabilización del biol y la acumulación de compuestos alcalinos (por ejemplo, amoníaco). Este comportamiento es común en procesos de fermentación de estiércol bovino, donde los microorganismos descomponen compuestos orgánicos y liberan productos que aumentan la alcalinidad.

Además, existe una tendencia coincidente entre los valores más altos de pH y los valores más altos de CE en la fecha del 13/06/2024. Esto podría indicar un mayor nivel de actividad microbiana o química que influye en ambas variables. En las fechas anteriores, los valores más bajos de pH (7.2) corresponden a una CE más baja, lo que sugiere un posible efecto de los procesos de degradación en las muestras. Por otro lado, la estabilidad del pH en las fechas iniciales (14/05/2024

y 29/05/2024) sugiere que el sistema todavía estaba en una etapa temprana del proceso de descomposición.

El aumento de CE refleja una mayor concentración de sales solubles e iones en el biol. Esto puede ser atribuible a la mineralización de materia orgánica durante el tiempo de almacenamiento en el biodigestor. Además, la CE es un parámetro crítico para evaluar la calidad del biol, ya que una conductividad excesivamente alta puede limitar su uso como biofertilizante debido a riesgos de salinidad para los cultivos.

El comportamiento sincrónico entre pH y CE podría estar relacionado con la liberación de amoníaco (NH_3) y otros compuestos nitrogenados durante la descomposición. Este fenómeno puede influir tanto en la alcalinidad como en la acumulación de iones, contribuyendo a la conductividad eléctrica.

Los resultados sugieren que el biol evaluado presenta características alcalinas y un aumento progresivo en la CE, lo que lo hace adecuado para uso agrícola como biofertilizante, siempre y cuando se controle su aplicación en suelos sensibles a la salinidad.

La evolución del pH y la CE a lo largo del tiempo sugiere que el biol alcanzó una mayor estabilización química hacia la fecha del 13/06/2024. Sin embargo, el uso de este biol debe considerarse con precaución, especialmente en suelos sensibles a la salinidad debido al incremento de CE.

Por lo que se refiere a la correlación entre el pH y la CE, el coeficiente $\rho=0.47$ $r_{\text{ho}} = 0.47$ sugiere que, en general, a medida que aumenta el pH, también tiende a aumentar la CE. Sin embargo, la relación no es completamente fuerte, lo que puede deberse a que hay otros factores además del pH que influyen en los valores de CE. Esto es consistente con lo que se observa en el gráfico de dispersión, donde la línea de tendencia muestra un comportamiento no completamente lineal, con una relación más fuerte en los extremos del rango de pH. El p-valor significativo indica que existe evidencia suficiente para afirmar que la correlación observada no es producto del azar. Esto refuerza la idea de que

hay una relación real entre el pH y la CE en las muestras analizadas. Este resultado puede reflejar procesos químicos relacionados con la mineralización y liberación de iones en el biodigestor. A medida que el pH aumenta (por ejemplo, debido a la acumulación de compuestos alcalinos como el amoníaco), también aumenta la cantidad de iones solubles en el biol, lo que incrementa la CE.

Los resultados en la estadística descriptiva para los sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT) y sólidos suspendidos fijos (SSF) muestran un comportamiento dinámico a lo largo del tiempo, reflejando los cambios en la composición del biol durante su proceso de estabilización. En términos generales, se observó un incremento progresivo en la concentración de los tres tipos de sólidos evaluados en las diferentes fechas de muestreo.

Los resultados de las pruebas estadísticas Kruskal-Wallis sugieren que la composición del biol cambia significativamente con el tiempo, posiblemente debido a la continua transformación de la materia orgánica y la acumulación de compuestos minerales durante el proceso de estabilización.

En términos generales, los resultados indican que el biol sigue un patrón de maduración en el que los ST y SSF aumentan con el tiempo, mientras que la fracción volátil se estabiliza. La alta variabilidad observada en la segunda fecha podría estar relacionada con una fase intermedia del proceso, en la que los cambios químicos y biológicos aún no han alcanzado un estado de equilibrio. La estabilización observada en la última fecha indica que el biol podría haber alcanzado un estado más estable y homogéneo, lo que podría tener implicaciones importantes en su aplicación como biofertilizante. Estos resultados proporcionan información clave sobre la evolución de la calidad del biol y pueden ser utilizados para determinar el momento óptimo para su uso en sistemas agrícolas.

El aumento progresivo de los sólidos volátiles totales (SVT) junto con los valores estables de pH y conductividad eléctrica (CE) demuestra que el sistema mantuvo un equilibrio adecuado para la digestión anaerobia, esto permitió obtener un biol con características deseables para aplicaciones agrícolas. En conjunto, los

valores reportados para cada parámetro y su estabilidad promueven tanto la actividad microbiana como la optimización del proceso de digestión anaerobia, maximizando los beneficios del biol como fertilizante orgánico y bioestimulante agrícola.

CONCLUSIONES

El estudio de la evolución fisicoquímica del biol recolectado en el biodigestor de la UAAAN-UL posibilitó la identificación de los cambios significativos en los parámetros evaluados durante la investigación. En el pH se observó una tendencia a la estabilización hacia la neutralidad, lo que beneficia la aplicación agrícola, ya que impide alteraciones químicas en el suelo. Por otro lado, el crecimiento registrado en la última fecha apunta a que el proceso de fermentación aún produce compuestos alcalinos que pueden contribuir a la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

La conductividad eléctrica presentó un incremento progresivo, esto indica una concentración de sales solubles mayor por la mineralización de la materia orgánica. Pese a que los resultados sugieren que el biol puede ser utilizado en suelos con baja salinidad, su uso en suelos sensibles tiene que estar monitoreándose constantemente para evitar efectos desfavorables en el desarrollo de los cultivos. La correlación entre el pH y la CE indica que existe una relación entre ellos, esto se puede vincular a la liberación de amoníaco, además de otros compuestos nitrogenados, en el transcurso de la digestión anaeróbica.

Los resultados de los sólidos presentaron una tendencia al incremento en los ST y SSF, lo que indica una estabilización mayor del biol con el tiempo. Por otro lado, la variabilidad observada en los SVT en la segunda fecha sugiere una fase intermedia de la transformación de la materia orgánica, en la que aún se realizan procesos bioquímicos fundamentales. La prueba de Kruskal-Wallis corroboró que dichos cambios son significativos estadísticamente, esto fortalece la necesidad de evaluar el biol en función del tiempo de producción.

Todos estos resultados permiten concluir que el biol cuenta con características aptas para su empleo como biofertilizante, toda vez que sean considerados, tanto el estado de madurez del biol, como las condiciones del suelo en el que se aplicará. Ahora bien, la estabilización que se observa en la última fecha sugiere que, en ese punto, el biol ha conseguido una estabilidad que aumenta su rendimiento como biofertilizante. No obstante, el aumento de la CE y la variación

del pH señala que es esencial un monitoreo constante para respaldar su efectividad sin provocar impactos negativos al suelo, tales como su estructura y su disponibilidad de nutrientes.

Finalmente, este trabajo destaca la importancia de evaluar periódicamente los parámetros fisicoquímicos del biol a lo largo del tiempo para determinar el momento óptimo de aplicación en cultivos agrícolas. Además, demuestra que el control de estos parámetros puede mejorar la eficiencia del biol, favoreciendo una agricultura más sostenible y basada en el aprovechamiento de residuos orgánicos. Investigaciones futuras podrían enfocarse en la optimización del proceso de biodigestión y en el análisis de otros compuestos presentes en el biol, con el fin de potenciar sus beneficios para la producción agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(03), 205-212.
- Álvarez-Valencia, L. H. (2024). Biocombustibles gaseosos mediante digestión anaerobia, una alternativa para la demanda energética. *Revista Ciencia UANL*, 27(125), 8-15.
- Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. E. (2018). Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(23), 40-47.
- Arguelles, C. W., Pintor, D. C. A., Mesinas, C. M., Márquez, H. L., & Becerra, E. V. (2023). Obtención de biofertilizantes enriquecidos en biodigestores semicontinuos a nivel laboratorio. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 5241-5258.
- Arifin, M. Z., Khoir, M., & Purwanto, B. (2020). Community attitudes towards biogas as an alternative energy and environmental quality improvement. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series*.
- Ávila, C. E., Salazar, N. M. O., & Calvo, V. P. (2020). Construcción de un biodigestor para la generación de biol y biogás a partir de residuos orgánicos. *Revista Gipama*, 2(1), 55-63.
- Bi, S., Hong, X., Yang, H., Yu, X., Fang, S., Bai, Y., . . . Wang, Y. (2020). Effect of hydraulic retention time on anaerobic co-digestion of cattle manure and food waste. *Renewable Energy*, 150, 213-220.
- Boe, K. (2006). Online monitoring and control of the biogas process. (Ph.D.), Institute of Environment & Resources, Denmark.
- Britto, Y. K., Cotes, D. A., & Rudas, A. R. (2023). Estimación de las variables microbiológicas de digestión anaeróbica de la mezcla estiércol bovino y caprino. *Revista Ambiental: aire, agua y suelo*, 14(2), 19-29.
- Cabos-Sánchez, J., Bardales-Vásquez, C. B., León-Torres, C. A., & Gil-Ramírez, L. A. (2019). Evaluación de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno

- en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. *Revista Arnaldoa del Museo de Historia Natural*, 26(3), 1165-1176.
- Camarena-Martinez, R., Lizarraga-Morales, R. A., & Baeza-Serrato, R. (2021). Classification of geomembranes as raw material for defects reduction in the manufacture of biodigesters using an artificial neuronal network. *Energies*, 14(21), 13. doi:10.3390/en14217345
- Cano Hernández, M. (2016). Caracterización de bioles de la fermentación anaeróbica de excretas bovinas y porcinas. *Agrociencia*, 50(4), 471-479.
- Cano, R., Nielfa, A., & Fdz-Polanco, M. (2014). Thermal hydrolysis integration in the anaerobic digestion process of different solid wastes: Energy and economic feasibility study. *Bioresource Technology*, 168, 14-22.
- Cardozo, J. A. (2019). Propuesta de biodigestor anaerobio de flujo continuo para el tratamiento de estiércol bovino y aguas residuales. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*(12), 12.
- Czekala, W. (2022). Digestate as a source of nutrients: Nitrogen and its fractions. *Water*, 14(24), 4067.
- DeCola, A. C., Toppen, L. C., Brown, K. P., Dadkhah, A., Rizzo, D. M., Ziels, R. M., & Scarborough, M. J. (2024). Microbiome assembly and stability during start-up of a full-scale, two-phase anaerobic digester fed cow manure and mixed organic feedstocks. *Bioresource Technology*, 394. doi:10.1016/j.biortech.2023.130247
- Duarte, R., Jr., Rossa, Ü., Chiarello, L. M., Scharf, D. R., Somensi, C. A., Vischetti, C., & Gonçalves, L. F. S. (2023). Biogas production and electricity generation from a quail manure wastewater treatment system per water depth. *Revista Brasileira De Ciencias Ambientais*, 58(2), 293-303. doi:10.5327/z2176-94781562
- Gil Ramírez, L. A., Leiva Cabrera, F. A., Cabos Sánchez, J. D., Jara Huacacolqui, E. L., Bardales Vásquez, C. B., & Torres, C. A. L. (2022). Influencia de las concentraciones del "biol" en el crecimiento y desarrollo de *Medicago sativa* (Fabaceae) "alfalfa". *Revista Arnaldoa del Museo de Historia Natural*, 29(1), 149-162.

- Gómez-Muñoz, L., Morales-Morales, C., Castro-Bello, M., González-Lorence, A., Marmolejo-Vega, C. V., & Zagal-Barrera, S. R. (2024). Design of experiments to evaluate pH and temperature parameters with different inoculums in domestic biodigester. *Heliyon*, 10(9).
- González, J. F., Parralejo, A. I., Gozález, J., Alvarez, A., & Sabio, E. (2022). Optimization of the production and quality of biogas in the anaerobic digestion of different types of biomass in a batch laboratory biodigester and pilot plant: Numerical modeling, kinetic study and hydrogen potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(93), 39386-39403. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.09.113
- Granados-Moreno, J. E., Abril-Herrera, D. A., & Mogollón-Reina, A. (2022). Biophysicochemical study of biodigesters fed with pig and bovine manure, in Sumapaz Province, Colombia. [Estudio biofísicoquímico de biodigestores alimentados con excretas porcinas y bovinas en la provincia Sumapaz, Colombia]. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(3).
- Granados, J. E., Abril, D. A., & Mogollón, A. (2022). Cinética de la digestión anaeróbica de excretas porcinas para la obtención de biogás en laboratorio. *Revista Ingeniería Agrícola*, 12(4).
- Issahaku, M., Derkyi, N. S. A., & Kemausuor, F. (2024). A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters. *Heliyon*, 10(1), 16. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e24019
- Kalaiselvan, N., Glivin, G., Bakthavatsalam, A. K., Mariappan, V., Premalatha, M., Raveendran, P. S., . . . Sekhar, S. J. (2022). A waste to energy technology for enrichment of biomethane generation: A review on operating parameters, types of biodigesters, solar assisted heating systems, socio economic benefits and challenges. *Chemosphere*, 293, 18. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.133486
- Khune, S., Otieno, B., Kabuba, J., Ochieng, G., & Osifo, P. (2023). Pilot scale study of anaerobic treatment of food waste using ambient and solar heated digesters. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 1572-1585. doi:10.1080/14786451.2023.2275818

- Macías Duarte, R., Grijalva Contreras, R. L., Robles Contreras, F., López Carvajal, A., & Núñez Ramírez, F. (2020). Respuesta de la composta sobre la fertilidad, humedad del suelo, contenido nutrimental en hojas y productividad en olivo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(8), 1879-1890.
- Manzano, D. R., Ortega, J. O., & Arias, A. E. (2024). Caracterización fisicoquímica del biol en varias mezclas generadas por biodigestión. *Revista Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad*, 3(1), 35-51.
- Mayans, B., Antón-Herrero, R., García-Delgado, C., Carreras, N., Delgado-Moreno, L., Escolástico, C., . . . Eymar, E. (2023). Enhancement of methane production from livestock manure with pre-treatments based in fungi of genus *Pleurotus*. *Biomass & Bioenergy*, 176, 8. doi:10.1016/j.biombioe.2023.106901
- Merino, J. P. E., Rojas, C. A., & Herrera, I. L. (2020). Caracterización y análisis para la aplicación de biol obtenido a partir de residuos orgánicos en la Unidad Experimental de Producción de Biogás en los laboratorios de Petróleo, Gas y Energías de la Universidad Privada del Valle. *Journal Boliviano de Ciencias*, 16(48), 50-65.
- Morales, I. J., Vega, M. A., Vanegas, A. P., Ortega, E. R., & Vanegas, D. L. (2023). Evaluación de la producción de biogás, a partir de un biodigestor utilizando residuos orgánicos y aguas residuales generadas en la central de abastos de Valledupar. *Revista Politécnica*, 19(37), 9-19.
- Navarrete-Molina, C. (2020). Los sistemas de producción de rumiantes en la Comarca Lagunera, México: impacto ambiental, tendencias productivas y estrategias de mitigación. (Doctor en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente En Zonas Áridas en México y Doctor en Recursos Naturales y Gestión Sostenible en España), Universidad Autónoma Chapingo,
- Neto, S. C., & de Oliveira, A. M. S. (2022). Innovation, technology and social management: the implementation of the country biodigester in the

- Tabuleiro Community, in Monte Alegre de Sergipe, Brazil. *Revista Tecnologia E Sociedade*, 18(51), 134-150. doi:10.3895/rts.v18n51.14756
- Nuhu, S. K., Gyang, J. A., & Kwarbak, J. J. (2021). Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 11. doi:10.1016/j.clet.2021.100298
- Obileke, K., Makaka, G., Nwokolo, N., Meyer, E. L., & Mukumba, P. (2022). Economic analysis of biogas production via biogas digester made from composite material. *Chemengineering*, 6(5), 12. doi:10.3390/chemengineering6050067
- Odales, L., López, E., López, L., Jiménez, J., & Barrera, E. L. (2020). Biofertilizer potential of digestates from small-scale biogas plants in the Cuban context. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(2), 14-26.
- Odega, C. A., Ayodele, O. O., Alagbe, O. A., Adewole, A. O., & Adekunle, A. E. (2022). Review of anaerobic digestion process for biogas production. *The Bioscientist Journal*, 10(1), 81-96.
- Ortega-Bucio, L. G., Hernández-Hernández, F., & Zea-Pérez, J. J. (2019). Biodigestor con variables monitoreadas. *Revista de Energía Química y Física*, 6(18), 37-47. doi:10.35429/JCPE.2019.18.6.37.47
- Ortiz, D. L. P., Botero-Londoño, M. A., & Botero-Londoño, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 149-160.
- Osorio, W. A. H., Carrera, P. J. V., Bonilla, J. I. C., & Salazar, F. S. A. (2023). Obtención de biogás y biol como fuente de energía renovable de biodigestores experimentales en la UTC extensión La Maná. *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación*, 8(2), 23-44.
- Paes, J. L., Alves, T. B. S., da Silva, L. D. B., Marques, A. D., & Dias, V. R. S. (2020). Use of inoculum in biodigesters with cattle manure under conventional and organic production systems. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 146-153. doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p146-153/2020

- Paes, J. L., Costa, L. M. P., Fernandes, P., Vargas, B. C., & Cecchin, D. (2023). Biogas production by anaerobic digestion of coffee husks and cattle manure. *Engenharia Agrícola*, 43, 9. doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43nepe20220126/2023
- Paolini Gómez, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 13-22.
- Parra-Ortiz, D. L., Botero-Londoño, M. A., & Botero-Londoño, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 149-160.
- Pluschke, J., Fasslrunner, K., Hadrich, F., Loukil, S., Chamkha, M., Geissen, S. U., & Sayadi, S. (2023). Anaerobic digestion of olive mill wastewater and process derivatives-biomethane potential, operation of a continuous fixed bed digester, and germination index. *Applied Sciences-Basel*, 13(17), 14. doi:10.3390/app13179613
- Ramírez, L. A. G., Cabrera, F. A. L., Escobedo, M. K. L., Vásquez, C. B. B., & Torres, C. A. L. (2023). Biofertilizante "biol": caracterización física, química y microbiológica. *ALFA. Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 7(20), 336-345.
- Reascos, G. M. E. R., Alvarez, W. F. G., Villarruel, É. J. C., & Coyago, R. F. S. (2022). Construcción de un biodigestor para generar energía renovable a partir de desechos orgánicos en el camal de Pacto-Ecuador. *Esferas*, 3, 134-153.
- Reyes-Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica Estelí*, 1(24), 60-81.
- Reynoso, F. (2020). Producción de grano de ecotipos locales de cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) con aplicación de biol de estiércol bovino en la Estación Experimental Choquenaira. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7(1), 30-39.

- Rivas-Solano, O., Faith-Vargas, M., & Guillén-Watson, R. (2016). Biodigesters: Chemical, physical and biological factors related to their productivity. *Revista Tecnología en Marcha*, 29, 47-53. doi:10.18845/tm.v29i5.2516
- Rostagno, M. N., Castignani, M. I., Mansilla, M., Rossler, N., & Osan, O. (2020). Evaluación económica y financiera de la implementación de un biodigestor en un tambo de la cuenca lechera Santafesina. *Revista Fave: sección ciencias agrarias*, 19(1), 67-79.
- Schoeber, M., Rahmann, G., & Freyer, B. (2021). Small-scale biogas facilities to enhance nutrient flows in rural Africa-relevance, acceptance, and implementation challenges in Ethiopia. *Organic Agriculture*, 11(2), 231-244. doi:10.1007/s13165-020-00329-9
- Secretaría de Economía. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015, Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México: Diario Oficial de la Federación Retrieved from https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5959/seeco12_C/seeco12_C.html
- Sibiya, N. T., Muzenda, E., & Tesfagiorgis, H. B. (2014). Effect of temperature and pH on the anaerobic digestion of grass silage. Paper presented at the 6th Int'l Conf. on Green Technology, Renewable Energy & Environmental Engg. (ICGTREEE'2014), Cape Town, South Africa.
- Silva-González, J. A., Hernandez-De Lira, I. O., Rodríguez-Martínez, A., Ruiz-Santoyo, G. A., Juárez-López, B., & Balagurusamy, N. (2021). Design of a centralized bioenergy unit at Comarca Lagunera, Mexico: Modeling strategy to optimize bioenergy production and reduce methane emissions. *Processes*, 9(8), 13. doi:10.3390/pr9081350
- Singh, B., Szamosi, Z., & Siménfalvi, Z. (2020). Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(4), 508-521. doi:10.1080/07388551.2020.1731413

- Soto, R., Avilés, S. M., Brígido, J. M., & Escobosa, M. I. (2024). *Avances en agricultura sostenible y cambio climático* (A. ediciones Ed. 1 ed.): Astra Editorial.
- Tangwe, S., Mukumba, P., & Makaka, G. (2022). Design and employing of a non-linear response surface model to predict the microbial loads in anaerobic digestion of cow manure: Batch balloon digester. *Sustainability*, 14(20), 25. doi:10.3390/su142013289
- Torres, A., Quipuzco, L., & Meza, V. (2015). Influencia de la fermentación láctica (abono bokashi) en el pre-compost para la producción de biogás y biol en biodigestores tipo batch. Paper presented at the Anales Científicos.
- Torres, N. A., Chavez, M. E., Del Castillo, L., Orosco, S. M., Sanchez Allendes, M. V., Moneta, D. F., . . . Rodriguez, S. R. (2020). Evaluación exploratoria de la calidad microbiológica de bioles producido a partir de estiércol bovino. Paper presented at the VIII Congreso Latinoamericano de Agroecología. SOCLA. , Montevideo, Uruguay.
- Uddin, M. M., & Wright, M. M. (2023). Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. *Physical Sciences Reviews*, 8(9), 2819-2837.
- Van, D. P., Fujiwara, T., Tho, B. L., Toan, P. P. S., & Minh, G. H. (2020). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*, 25(1), 1-17. doi:10.4491/eer.2018.334
- Velásquez-Piñas, J. A., Calle-Roalcaba, O. D., Miramontes-Martínez, L. R., & Alonso-Gómez, L. A. (2023). Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio. *Revista Ion*, 36(1), 29-47.
- Venegas-Venegas, J. A., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., Pérez-Fernández, A., Aryal, D. R., & Aguilar-Aguilar, F. A. (2023). Potencial de biogás, energía eléctrica, reducción de CO₂eq y rentabilidad de biodigestor-motogenerador para establos lecheros en México. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 33(62), 20.

- Viegas, B. K. R., Guimaraes, G. D., Kuwano, R. T., de Oliveira, B. O. S., & Alves, R. C. (2023). Análise da implantação de um biodigestor: estudo de caso na área central de Itacoatiara/am. *Revista Científica Da Faculdade De Educacao E Meio Ambiente*, 14(1), 152-168. doi:10.31072/rcf.v14i1.1227
- Yamaji, D. M., Amâncio-Vieira, S. F., Fidelis, R., & Contani, E. A. D. (2024). Proposal of multicriteria decision-making models for biogas production. *Energies*, 17(4), 18. doi:10.3390/en17040806
- Zamri, M., Hasmady, S., Akhilar, A., Ideris, F., Shamsuddin, A. H., Mofijur, M., . . . Mahlia, T. M. (2021). A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 137, 17. doi:10.1016/j.rser.2020.110637