UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"CUANTIFICACIÓN TEÓRICA DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE BIOMETANO EXPERIMENTAL A PARTIR DE SUERO DE LECHE, MELAZA Y ESTIÉRCOL OVINO"

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Línea de investigación: Gestión, producción, productividad, innovación y desarrollo socioeconómico

AUTOR:

SCARLET ANAHÍ URBINA VARGAS

DIRECTOR:

ING. JUAN CARLOS DE LA VEGA QUINTERO. MSc

Ibarra – Ecuador

2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Urbina Vargas Scarlet Anahí

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	CUANTIFICACIÓN TEÓRICA DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE BIOMETANO EXPERIMENTAL A PARTIR DE SUERO DE LECHE, MELAZA Y ESTIÉRCOL OVINO.
AUTOR (ES):	Scarlet Anahí Urbina Vargas
FECHA:	16/04/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	☒ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Agroindustrial
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero. MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días del mes de agosto del 2026

EL AUTOR



Scarlet Anahi Urbina Vargas
C.I: 1004497697

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 29 de julio del 2026

Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero MSc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN CARLOS DE LA VEGA QUINTERO

Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero MSc.
C.I: 1002958856

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular "Cuantificación teórica de producción energética de biometano experimental a partir de suero de leche, melaza y estiércol ovino" elaborado por Urbina Vargas Scarlet Anahí previo a la obtención del título de Ingeniera Agroindustrial, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN CARLOS DE LA VEGA QUINTERO

Ing. Juan Carlos de la Vega Quintero MSc.

C.I: 1002958856

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JIMMY NUNEZ PEREZ

Ing. Jimmy Nuñez Pérez MSc.

C.I: 1756606339

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi fuente de sabiduría, por acompañarme en cada paso y permitirme culminar esta importante etapa de mi vida.

A mi madre, por su amor incondicional, su sacrificio, apoyo y confianza. Por ser mi ejemplo de fortaleza y la persona que siempre creyó en mí. Este logro también es suyo.

A mi ángel, mi papito Humberto, quien desde el cielo ha iluminado mi camino. Su recuerdo, sus enseñanzas y el amor que siempre me brindó permanecerán por siempre en mi corazón. Este logro está dedicado a su memoria.

A mi bebé, quien se convirtió en la mayor motivación para seguir adelante. Aun antes de conocerte, me inspiraste a luchar con más fuerza por mis sueños. Todo este esfuerzo es también para ti, con la esperanza de brindarte un futuro lleno de oportunidades y amor.

Con todo mi cariño, dedico este logro a quienes han sido la inspiración y la razón de mi esfuerzo.

Scarlet Urbina

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida y por brindarme la fortaleza y la sabiduría necesarias para alcanzar esta meta.

A mi madre, Elisabet Vargas, por su amor incondicional, su esfuerzo, apoyo y confianza en cada momento de mi formación. Gracias por ser mi mayor ejemplo de perseverancia y por impulsarme siempre a seguir adelante.

A mi hermana, Micaela Urbina, por su cariño, comprensión y apoyo constante durante este proceso académico.

A mi tía, Alba Vargas, por su apoyo, sus palabras de aliento y por estar presente en los momentos en que más lo necesité.

Mi profundo agradecimiento a mi director de tesis Ing. Juan Carlos de la Vega y a mi asesor Ing. Jimmy Núñez, por su guía, dedicación, conocimientos y valioso acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Sus aportes y recomendaciones fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron y me brindaron su apoyo para hacer posible la realización de esta tesis.

Scarlet Urbina

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación tuvo como objetivo cuantificar teóricamente la producción energética de biometano experimental a partir de suero de leche y estiércol ovino, mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa para la generación de energía renovable y la gestión sostenible de desechos orgánicos.

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y experimental. Se caracterizaron las materias primas mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos, incluyendo pH, sólidos totales, sólidos volátiles y análisis elemental. Posteriormente, se llevó a cabo la digestión anaerobia en condiciones mesofílicas utilizando el sistema AMPTS II, con reactores de 300 mL de volumen de trabajo, conformados por una mezcla de 67 % de suero de leche y 33 % de estiércol ovino. La producción de metano fue monitoreada durante el período experimental y la cuantificación teórica de la energía se realizó a partir del volumen acumulado de metano obtenido, expresado en NmL y convertido a unidades de energía (MJ y kWh) mediante el poder calorífico inferior del metano.

Los resultados evidenciaron variaciones en la producción de metano entre las cinco muestras analizadas, alcanzando un valor máximo de 3336,2 NmL de CH_4 y un valor mínimo de 145,4 NmL, lo que se reflejó en diferencias en la producción energética teórica. Estos resultados demuestran el potencial del suero de leche y el estiércol ovino como sustratos para la producción de biometano, destacando la importancia del control de las condiciones del proceso para optimizar el rendimiento de la digestión anaerobia.

Se concluye que la valorización de estos residuos agroindustriales constituye una alternativa viable para la obtención de bioenergía, contribuyendo a la economía circular, a la reducción del impacto ambiental y al aprovechamiento sostenible de subproductos generados por las actividades agropecuarias.

Palabras clave: biometano, digestión anaerobia, suero de leche, estiércol ovino, producción energética, residuos agroindustriales, AMPTS II.

ABSTRACT

The aim of this research was to theoretically quantify the energy production of experimental biomethane from whey and sheep manure by using agro-industrial residues as an alternative source of renewable energy and a sustainable strategy for organic waste management.

The study was conducted using a quantitative and experimental approach. The raw materials were characterized by determining their physicochemical properties, including pH, total solids, volatile solids, and elemental composition. Subsequently, anaerobic digestion was carried out under mesophilic conditions using the Automatic Methane Potential Test System II (AMPTS II), with reactors having a working volume of 300 mL, consisting of 67% whey and 33% sheep manure. Methane production was monitored throughout the experimental period, and the theoretical energy production was estimated from the cumulative methane volume obtained, expressed in normal milliliters (NmL) and converted into energy units (MJ and kWh) using the lower heating value of methane.

The results showed variations in methane production among the five samples analyzed, with a maximum cumulative methane production of 3,336.2 NmL CH_4 and a minimum of 145.4 NmL CH_4, resulting in differences in the estimated theoretical energy production. These findings demonstrate the potential of whey and sheep manure as suitable substrates for biomethane production, highlighting the importance of controlling the anaerobic digestion process to optimize methane yield.

It is concluded that the valorization of these agro-industrial residues represents a viable alternative for bioenergy production, contributing to the circular economy, reducing environmental impacts, and promoting the sustainable use of by-products generated by agricultural and livestock activities.

Keywords: biomethane, anaerobic digestion, whey, sheep manure, energy production, agro-industrial residues, AMPTS II.

Tabla de contenido

CAPÍTULO I 1

INTRODUCCIÓN 1

Tema: 1

1.1. Problema 1

1.2. Justificación 2

1.3. Antecedentes 3

1.4. Objetivos 6

1.5. Hipótesis 6

CAPITULO II 6

MARCO TEÓRICO 6

2.1. Digestión anaeróbica como un procedimiento de bioenergía 6

2.2. Características físico-químicas de los sustratos 8

2.3. Suero de leche 9

2.4. Melaza 9

2.5. Estiércol ovino 9

2.6. Sinergia metabólica y codigestión anaeróbica 9

2.7. Conversión energética del metano 10

2.8. Capacidad bioquímica del metano (BMP) 12

2.9. Estimación teórica 13

2.10. Fundamentos bioquímicos de la metanogénesis 14

2.12. Inhibidores del proceso anaerobio 17

2.13. Balance de materia y relación DQO–metano 18

2.14. Impacto ambiental y sostenibilidad 19

CAPÍTULO III 20

MATERIALES Y MÉTODOS 20

3.1. Tipo de investigación 20

3.2. Ubicación del lugar de estudio 20

3.3. Materiales e insumos, equipos, reactivos, software 21

3.4. Métodos, técnicas e instrumentos 21

CAPÍTULO IV 31

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 31

4.1. Caracterización las propiedades físico-químicas de los sustratos destinados al proceso de digestión anaerobia. 31

4.2. Experimentación de la digestión anaerobia para la obtención de metano a partir de mezclas controladas de suero de leche, melaza y estiércol ovino. 33

4.3. Cuantificar teóricamente la producción energética potencial del biometano obtenido 38
4.4. Contrastación de la hipótesis 41
CAPÍTULO V 43
Conclusiones y Recomendaciones 43
5.1. Conclusiones 43
5.2. Recomendaciones 44
Bibliografías 45
ANEXOS 50

Índice de Tablas

Tabla 1. *Materiales y equipos* 21
Tabla 2. *Caracterización de la materia prima* 21
Tabla 3. *Niveles del factor de estudio.* 26
Tabla 4. *Mezclas controladas en porcentaje.* 27
Tabla 5. Resultados de la caracterización de la materia prima 31
Tabla 6. Disponibilidad de las unidades experimentales después de la depuración del reporte AMPTS II 33
Tabla 7. Producción de metano de los tratamientos a las 53,25 horas de digestión anaerobia 34
Tabla 8. Producción acumulada de metano al último tiempo disponible de cada unidad experimental válida 37
Tabla 9. Producción experimental, potencial teórico y energía de los tratamientos a las 53,25 horas 39

Índice de Figuras

Figura 1. *Equipo AMPTS II* 24
Figura 2. *Diagrama de Flujo Digestión Anaeróbica* 28
Figura 3. *Evolución de la producción acumulada de metano durante las primeras 53,25 horas* 36
Figura 4. *Rendimiento específico de metano de los tratamientos a las 53,25 horas* 36
Figura 5. *Producción energética experimental de los tratamientos a las 53,25 horas* 40
Figura 6. *Comparación entre el metano experimental y el potencial teórico calculado a partir de la DQO* 42

Índice de Ecuacines

Ecuación 1. Conversión del volumen de metano de Nml Nm3 29
Ecuación 2. Fracción de metano contenida en el biogás 29
Ecuación 3. Conversión de energía 30

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Tema: Cuantificación teórica de producción energética de biometano experimental a partir de suero de leche, melaza y estiércol ovino.

1.1. Problema

La creciente dependencia de los combustibles fósiles y el aumento constante de los combustibles emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento constante de las emisiones de gases de efecto invernadero han hecho necesaria la diversificación de la matriz energética hacia fuentes renovables y sostenibles, han hecho necesario la diversificación de la matriz energética hacia fuentes renovables y sostenibles (Maldonado, 2025).

En este contexto, el biogás y, especialmente, el biometano, fracción purificada con alto contenido de metano y fracción alto poder calorífico son con alto contenido en metano y elevado poder calorífico son alternativas energéticas con un importante potencial para ayudar a la transición hacia sistemas de producción bajos en carbono (Morocho, 2023). De acuerdo a lo expuesto por autores, se pude comprender que estas alternativas energéticas disponen un significativo potencial para ayudar a la transición hacia sistemas de producción bajos en carbono.

En el sector agroindustrial se generan grandes cantidades de residuos, como suero, melaza y estiércol de oveja. En muchos casos, la eliminación inadecuada de estos residuos contamina suelos y cuerpos de agua debido a su alto contenido de materia orgánica, como suero, melaza y estiércol de oveja. La eliminación inadecuada de estos desechos contamina suelos y cuerpos de agua debido a su alto contenido de materia orgánica.

El estudio de Granda (2025) muestras recientes que anaeróbico la cogestión de subproductos lácteos y estiércoles aumenta la producción de metano en comparación con la digestión individual de cada sustrato, lo que demuestra su potencial energético y ambiental. La digestión de subproductos lácteos y estiércol aumenta la producción de metano en comparación con la digestión individual de cada sustrato, demostrando su potencial energético y ambiental.

Sin embargo, la combinación específica de suero, melaza y estiércol de oveja no se ha examinado adecuadamente desde una perspectiva de cuantificación teórica del potencial energético. El estiércol ha sido examinado inadecuadamente desde una perspectiva de cuantificación teórica del potencial energético. La mayoría de las investigaciones priorizan los ensayos experimentales sin incorporar modelos estequiométricos que permitan una estimación previa de la viabilidad energética del sistema. viabilidad (Bernal y Chadwick, 2021). Esta limitación complica la planificación de proyectos sostenibles en entornos rurales, donde la evaluación preliminar del rendimiento energético es crucial para la toma de decisiones técnicas y económicas.

La mayoría de estudios se han centrado en análisis experimentales, pero no en la estimación teórica del potencial energético, lo cual es esencial para planificar proyectos viables en zonas rurales (Khan et al., 2021). La falta de estudios que analicen la combinación de estos residuos limita el desarrollo de modelos eficientes de aprovechamiento energético adaptados a contextos agroindustriales y rurales (Gupta et al., 2020).

1.2. Justificación

Esta investigación propone la valorización energética de residuos agroindustriales como el suero de leche, la melaza y el estiércol ovino a través de su transformación en biometano, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y energética. La cuantificación

teórica del potencial energético de estos residuos permitirá sentar las bases para futuros estudios experimentales y para el diseño de sistemas de digestión anaerobia adaptados a las condiciones locales (Lozano et al., 2021).

La codigestión de estos tres sustratos puede generar una sinergia en la producción de biogás, mejorando la relación carbono-nitrógeno y promoviendo un entorno más favorable para las bacterias metanogénicas. Esta sinergia ha sido evidenciada en investigaciones recientes que destacan cómo la mezcla adecuada de residuos con diferentes características fisicoquímicas puede mejorar la eficiencia del proceso (Silva et al., 2020). Además, el aprovechamiento de estos residuos permite disminuir la carga contaminante generada por el mal manejo de efluentes agroindustriales, mitigando su impacto en suelos y cuerpos hídricos (Torres-Pérez et al., 2022).

El enfoque teórico empleado en este estudio permite estimar la producción energética sin recurrir de inmediato a pruebas experimentales costosas, lo que es especialmente útil para iniciativas desarrolladas en zonas rurales o con recursos técnicos limitados. Esta aproximación contribuye a la democratización del conocimiento y a la promoción de tecnologías limpias y accesibles para pequeños productores (Ramírez et al., 2019). De esta forma, el presente estudio representa no solo una contribución al conocimiento científico, sino también una oportunidad concreta para fomentar la autosuficiencia energética y la economía circular en el sector agroindustrial (Méndez y Rivas, 2021).

1.3. Antecedentes

La disolución anaerobia es un proceso biológico que tiene lugar sin oxígeno, en el cual consorcios de microorganismos descomponen materia orgánica compleja en compuestos más sencillos, produciendo biogás compuestos principalmente por dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) (Espinosa, 2021). Este procedimiento consta de cuatro fases esenciales:

acidogénesis, metanogénesis, acetogénesis e hidrólisis, todas ellas conducidas por grupos microbianos concretos.

El suero de leche, subproducto altamente contaminante de la industria quesera, presenta altos valores de demanda química de oxígeno (hasta 60.000 mg/L), sólidos totales entre 6–7% y un pH ligeramente ácido (4.0–4.5), lo cual puede inhibir la actividad metanogénica si no se ajustan las condiciones adecuadas o se complementa con otros sustratos (Torres Q. , 2021). Por su parte, la melaza, derivada de la caña de azúcar, aporta una elevada carga orgánica fácilmente biodegradable y una relación carbono/nitrógeno (C/N) que puede variar entre 25:1 y 30:1, lo que la convierte en un co-sustrato ideal para corregir desequilibrios nutricionales en la mezcla (Lizárraga y Mendoza, 2023). El estiércol ovino, aunque menos estudiado que otros estiércoles, ha demostrado contener sólidos totales del 15 al 20%, un pH entre 6.8 y 7.2, y una relación C/N que oscila entre 10:1 y 18:1, lo cual contribuye a estabilizar el proceso al actuar como fuente microbiana y de amortiguación (Párraga y Chávez, 2020).

En cuanto a las condiciones que rigen el proceso de digestión anaerobia, se ha documentado que parámetros como la temperatura (generalmente en rango mesofílico de 35–37 °C), el pH (ideal entre 6.8 y 7.5), el tiempo de retención hidráulica (TRH) y la proporción entre los sustratos influyen directamente en la producción de metano y la estabilidad del sistema.

Por ejemplo, Muñoz (2020) reporta una producción de metano del 78,34% utilizando estiércol bovino bajo condiciones controladas de 35 °C, pH 8 y TRH de 2 días. Asimismo, en una planta piloto, Torres y Cárdenas (2020) encontraron que un TRH de 15 días y temperaturas constantes en rango mesofílico optimizaron la generación de biogás a partir de residuos pecuarios. No obstante, aún son escasos los estudios que aborden de forma específica las condiciones óptimas de digestión para mezclas que involucren suero de leche, melaza y

estiércol ovino, lo cual representa una oportunidad para el desarrollo de investigaciones con enfoques experimentales más dirigidos.

Respecto a la estimación del potencial energético del biogás generado, recientes metodologías han considerado la concentración de metano en el biogás (60–70%) y su poder calorífico (35,8 MJ/m³) como base para cuantificar su viabilidad como fuente energética. Cabezas y Andrade (2025) por ejemplo, calcularon que el estiércol vacuno disponible en Perú podría generar hasta 1.718,9 GWh/año, aplicaron un enfoque similar en residuos de cosechas cacaoteras, demostrando su capacidad para generar energía renovable a partir de residuos agrícolas locales. Sin embargo, la estimación teórica del potencial energético en mezclas específicas, como la que combina suero de leche, melaza y estiércol ovino, sigue siendo limitada, lo que justifica la importancia de nuevas investigaciones que integren la caracterización del sustrato con evaluaciones prácticas y energéticas.

Para ello, el volumen expresado en mililitros normales (NmL) fue convertido a metros cúbicos normales (Nm³) mediante un factor de conversión de unidades. Posteriormente, la energía teórica se estimó utilizando el poder calorífico inferior (PCI) del metano, equivalente a 35,8 MJ/Nm³, metodología ampliamente empleada para evaluar el potencial energético del biogás (European Union, 2019).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Cuantificar teóricamente la producción energética de biometano experimental a partir de suero de leche, melaza y estiércol ovino.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los sustratos destinados al proceso de digestión anaerobia.
- Experimentar la digestión anaerobia para la obtención de metano a partir de mezclas controladas de suero de leche, melaza y estiércol ovino.
- Cuantificar teóricamente la producción energética potencial del biometano obtenido a partir de residuos agroindustriales.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis Alternativa (HA)

La codigestión anaerobia de suero de leche, melaza y estiércol ovino genera una producción teórica significativa de biometano y energía aprovechable, en función de las características fisicoquímicas de las materias primas.

1.5.2. Hipótesis Nula (HO)

La codigestión anaerobia de suero de leche, melaza y estiércol ovino no genera una producción teórica significativa de biometano ni de energía aprovechable.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Digestión anaeróbica como un procedimiento de bioenergía

2.1.1. Fundamentos microbiológicos del proceso

La digestión anaerobia (DA) es un procedimiento biotecnológico a través del cual, en el contexto de consorcios microbianos, la materia orgánica se descompone sin oxígeno y produce biogás que contiene, sobre todo, metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este procedimiento es una tecnología establecida para la valorización energética de desechos agropecuarios e industriales, y se incorpora en planes de transición energética y economía circular (Mao et al., 2015)

Según Vásquez (2023), el proceso se lleva a cabo en cuatro fases metabólicas que dependen unas de otras:

- Hidrólisis: degradación de polímeros complejos (proteínas, lípidos y carbohidratos) en compuestos solubles.
- Acidogénesis: conversión de monómeros en ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes e hidrógeno.
- Acetogénesis: transformación de productos intermedios en acetato, CO_2 e hidrógeno.
- Metanogénesis: conversión final de acetato e hidrógeno en metano por arqueas metanogénicas.

La metanogénesis representa la fase crítica para la recuperación energética del sistema, ya que determina el volumen final de CH_4 producido (Vásquez J. , 2023).

2.1.2. Parámetros operativos determinantes

La eficiencia del proceso depende de condiciones operativas específicas como:el pH óptimo: 6.8–7.5, la temperatura mesofílica entre 35–37 °C, además de la relación inóculo–sustrato (ISR), la carga orgánica aplicada (OLR) y el tiempo de retención hidráulica (TRH). Asimismo, la acumulación excesiva de AGV puede provocar inhibición de arqueas metanogénicas, reduciendo la producción de metano. Estudios recientes demuestran que el

control adecuado de estos parámetros maximiza el rendimiento específico de metano (NmL CH_4/g SV) y mejora la estabilidad microbiológica (Espitia, 2022).

2.1.3. Importancia energética y Ambiental

La digestión anaerobia permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al capturar y aprovechar el metano que, de otro modo, sería liberado a la atmósfera durante la descomposición natural de los residuos orgánicos. Además, contribuye a la sustitución parcial de combustibles fósiles al generar una fuente de energía renovable que puede emplearse en distintos sectores productivos. Como subproducto del proceso, se obtiene digestato, el cual puede utilizarse como biofertilizante debido a su contenido de nutrientes, favoreciendo la sostenibilidad agrícola (Liebetrau et al., 2022).

Por otra parte, el biometano obtenido tras la purificación del biogás puede alcanzar una calidad similar a la del gas natural convencional. Esta característica facilita su utilización en sistemas de generación eléctrica o térmica, así como su integración en infraestructuras energéticas existentes, ampliando las posibilidades de aprovechamiento energético del recurso. (Liebetrau et al., 2022).

2.2. Características físico-químicas de los sustratos

2.2.1. Parámetros de evaluación bioenergética

Para calcular su potencial bioenergético, es crucial caracterizar los residuos que se utilizan en la digestión anaerobia. Es posible calcular la parte biodegradable que hay disponible para generar metano utilizando parámetros como la composición elemental, el pH, los sólidos volátiles (SV), los sólidos totales (ST) y la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos volátiles son el segmento orgánico que puede ser degradado por medios biológicos, y el DQO indica cuánta materia orgánica oxidable hay en el sustrato (Montoya, 2021).

2.3. Suero de leche

El suero de leche es un subproducto de la industria láctea que contiene mucha lactosa y tiene una DQO alta, lo cual lo hace un sustrato con un alto grado de biodegradabilidad. Investigaciones recientes indican que, en condiciones mesofílicas controladas, el metano tiene potenciales de 300 a 400 NmL CH_4/g SV (Mainardis et al., 2019).

Sin embargo, su rápida fermentación puede provocar que se acumulen AGV y que el pH disminuya, lo cual requiere la combinación con sustratos que tengan una mayor capacidad tampón.

2.4. Melaza

La melaza de caña es rica en azúcares simples (glucosa, fructosa y sacarosa), lo que favorece una acidogénesis acelerada y alta tasa máxima de producción de metano (Rmax). Estudios de modelación cinética han demostrado que la incorporación controlada de melaza incrementa la producción acumulativa de CH_4 cuando se combina con suero (Espín Valladares et al., 2023).Sin embargo, una carga orgánica excesiva puede generar inhibición por sobrecarga.

2.5. Estiércol ovino

En el estiércol ovino proporciona microorganismos metanogénicos, capacidad de amortiguamiento y nitrógeno que es esencial para mantener el equilibrio nutricional del sistema, mientras que la melaza tiene azúcares simples que se fermentan con facilidad y una relación óptima (Gavilanes, 2024). Si la mezcla de estos desechos es apropiada, se puede lograr una estabilidad óptima del proceso y una conversión máxima de materia orgánica en metano.

2.6. Sinergia metabólica y codigestión anaeróbica

2.6.1. Fundamento teórico

La codigestión anaerobia es el proceso de digerir, al mismo tiempo, dos o más sustratos para optimizar el desempeño del procedimiento en comparación con la digestión individual. Esta estrategia hace posible la optimización de la relación entre carbono y nitrógeno, el equilibrio de las carencias nutricionales y la dilución de posibles compuestos inhibidores. La combinación de residuos con distintas composiciones bioquímicas produce efectos sinérgicos que aumentan la producción de metano, como han demostrado varias investigaciones (Espinosa, 2021).

Se ha demostrado que la combinación de residuos agroindustriales con estiércoles puede incrementar la producción de metano entre 15% y 40% en comparación con la monodigestión (Zhang et al., 2023).

2.6.2. Complementariedad metabólica

En sistemas que mezclan estiércol con residuos abundantes en carbohidratos, se optimiza la disponibilidad de nutrientes fundamentales y se estimula la actividad metanogénica. El suero de leche y la melaza suministran carbono que se degrada con facilidad, por otro lado, el estiércol ovino funciona como fuente de inóculo y estabiliza el pH. Esta complementariedad metabólica, según Bernal y Chadwick (2021), disminuye el riesgo de acidificación y posibilita una interacción más eficaz de la materia orgánica. Así, la codigestión constituye una opción técnica para mejorar el rendimiento energético en entornos agroindustriales (Zhang et al., 2023).

2.7. Conversión energética del metano

2.7.1. Poder calorífico

El metano posee un poder calorífico inferior aproximado de 35,8 MJ/m³, lo que lo posiciona como un combustible de alto contenido energético en comparación con otras fuentes renovables gaseosas. Esta propiedad energética se debe a su elevada proporción de hidrógeno por unidad de carbono, lo que permite liberar una cantidad significativa de energía

durante su combustión. En el contexto de la digestión anaerobia, el metano constituye el principal componente energético del biogás, por lo que su cuantificación resulta fundamental para estimar el rendimiento del sistema.(Espinoza, 2024).

2.7.2. Calculo energético

Para realizar el cálculo energético del metano producido es necesario considerar su poder calorífico inferior, equivalente aproximadamente a 35,8 MJ por metro cúbico. A partir de este valor, la energía generada puede estimarse mediante la siguiente expresión:

- Energía (MJ) = Volumen CH_4 (m^3) × 35,8 MJ/m^3

Esta ecuación permite transformar el volumen de metano obtenido experimentalmente en unidades energéticas, facilitando la interpretación del rendimiento del sistema de digestión anaerobia en términos de energía disponible.

Cuando se requiere expresar el resultado en kilovatios hora (kWh), unidad comúnmente utilizada en análisis eléctricos y comparaciones energéticas, se aplica la conversión:

- Energía (kWh) = Energía (MJ) / 3,6

Esta cuantificación energética es fundamental para evaluar la viabilidad técnica del proceso, comparar diferentes tratamientos experimentales o mezclas de sustratos y proyectar posibles aplicaciones en generación eléctrica o térmica (Nasir et al., 2012).

2.7.3. Aplicaciones

El biogás es una fuente renovable polivalente debido a sus múltiples usos energéticos. Es posible emplearlo para la producción de electricidad a través de motores de combustión interna, microturbinas o sistemas de cogeneración (CHP), que posibilitan la elaboración simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de un solo combustible, lo cual mejora el rendimiento global del sistema. Además, se puede utilizar irectamente para generar energía

térmica por medio de calderas, sistemas de calefacción u hornos industriales. Es particularmente beneficioso en el contexto agroindustrial, donde se necesita calor para los procesos productivos.

Cuando el biogás es sometido a procesos de purificación para remover dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos, se obtiene biometano con una concentración de metano similar al gas natural. Este puede inyectarse en redes de distribución de gas o utilizarse como combustible vehicular, ampliando su aprovechamiento energético y contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes. De esta manera, el biogás no solo representa una alternativa para la gestión sostenible de residuos, sino también un componente estratégico en la transición hacia sistemas energéticos más limpios (Negro et al., 2025).

2.8. Capacidad bioquímica del metano (BMP)

2.8.1. Definición

El Potencial Bioquímico de Metano (BMP, por sus siglas en inglés) es el parámetro que indica el volumen máximo de metano que puede producirse a partir de una cantidad específica de materia orgánica bajo condiciones anaerobias controladas. Este indicador permite evaluar la fracción biodegradable del sustrato y estimar su capacidad de conversión en energía, constituyéndose en un criterio técnico esencial para analizar su aprovechamiento en sistemas de digestión anaerobia (Flores, 2025). demás, el BMP funciona como una herramienta comparativa que facilita la evaluación del rendimiento energético entre distintos residuos orgánicos. Su determinación permite establecer la viabilidad técnica de su utilización en procesos de producción de biogás y biometano, así como optimizar la selección y combinación de sustratos en estudios de codigestión orientados a maximizar la generación energética.

2.8.2. Determinación experimental

La determinación del Potencial Bioquímico de Metano (BMP) se realiza mediante ensayos en reactores cerrados tipo batch, donde se controlan variables fundamentales como el

pH, la temperatura y la relación entre el inóculo y el sustrato. Estas condiciones permiten reproducir un entorno anaerobio estable y asegurar que la producción de metano refleje únicamente la biodegradabilidad del material evaluado. Durante el ensayo, se mide el volumen acumulado de metano hasta que la producción alcanza una fase de estabilización, indicando que la fracción biodegradable ha sido degradada en su mayor parte. El rendimiento se expresa comúnmente en NmL CH_4 por gramo de sólidos volátiles (SV), unidad que facilita la comparación del potencial energético entre distintos sustratos o mezclas en estudios experimentales de digestión anaerobia (Mao et al., 2015).

2.9. Estimación teórica

El Potencial Bioquímico de Metano (BMP) también puede calcularse de forma teórica mediante la ecuación de Buswell, la cual se fundamenta en la composición elemental del sustrato, considerando principalmente su contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. A partir de estos elementos, la ecuación establece una relación estequiométrica que permite estimar la producción máxima de metano bajo el supuesto de una degradación completa de la materia orgánica en condiciones ideales. El valor obtenido mediante este procedimiento representa un límite teórico de producción de metano, que sirve como referencia para comparar resultados experimentales y evaluar la eficiencia real del proceso. Asimismo, este cálculo es útil en el diseño experimental, en la selección de mezclas de sustratos y en la realización de estudios preliminares de viabilidad energética, ya que permite proyectar el potencial máximo de generación de biometano antes de su validación en laboratorio (Mao et al., 2015).

2.9.1. Importancia de la cuantificación energética

El Potencial Bioquímico de Metano (BMP) facilita la comparación del rendimiento energético entre distintos residuos orgánicos, ya que permite cuantificar la cantidad máxima de metano que puede generarse a partir de cada sustrato bajo condiciones controladas. Valores elevados de BMP indican una alta fracción biodegradable y una mayor eficiencia en la conversión de materia orgánica en energía, lo que sugiere un mayor potencial de aprovechamiento energético. La determinación de este parámetro es fundamental en el diseño y dimensionamiento de biodigestores, así como en la planificación de proyectos de producción de biogás y biometano. Contar con datos confiables de BMP permite estimar la producción esperada de metano, evaluar la viabilidad técnica del sistema y optimizar la selección y proporción de sustratos en estudios experimentales y aplicaciones a mayor escala. (Villegas y Caiza, 2024).

Este parámetro permite estimar el potencial energético en términos de megajulios (MJ) o kilovatios hora (kWh) a partir del volumen de metano producido, estableciendo una relación directa entre la generación de gas y la energía disponible. De esta manera, no solo se cuantifica la producción volumétrica de CH_4, sino también su aporte energético real dentro del sistema. En procesos de codigestión, como los que combinan suero de leche, melaza y estiércol ovino, este indicador resulta especialmente útil para evaluar posibles efectos sinérgicos entre sustratos y seleccionar las mezclas que presenten mayor rendimiento energético, estabilidad operativa y eficiencia en la conversión de materia orgánica en biometano (Zhang et al., 2023).

2.10. Fundamentos bioquímicos de la metanogénesis

2.10.1. Rutas metabólicas del metano

La producción biológica de metano durante la digestión anaerobia ocurre principalmente a través de dos rutas metabólicas: la vía acetoclástica y la vía hidrogenotrófica. En la vía acetoclástica, el acetato se convierte directamente en metano y dióxido de carbono, mientras que en la vía hidrogenotrófica el metano se forma mediante la reducción del CO_2 utilizando hidrógeno como donador de electrones. La predominancia de una u otra vía depende tanto de la composición del sustrato como de las condiciones operativas del sistema, tales como el pH, la temperatura y la concentración de intermediarios metabólicos. En residuos con alto contenido de carbohidratos fácilmente fermentables, como la melaza y el suero de leche, suele predominar la vía acetoclástica, ya que durante la acidogénesis se produce una elevada cantidad de acetato. Este compuesto se convierte en el principal precursor del metano en la etapa final del proceso, favoreciendo una producción significativa de CH_4 cuando las condiciones del sistema se mantienen estables (Mao et al., 2015).

2.10.2. Microorganismos metalogénicos

Los géneros *Methanobacterium, Methanosarcina* y *Methanosaeta* se encuentran entre las arqueas metanogénicas más representativas en procesos de digestión anaerobia. Estas comunidades microbianas desempeñan un papel esencial en la etapa final de producción de metano y son altamente sensibles a variaciones en el pH y en la concentración de amoníaco. Alteraciones en estos parámetros pueden afectar su actividad metabólica y reducir la eficiencia global del sistema. De acuerdo con investigaciones recientes (Feng et al., 2022), la estabilidad y predominancia de estas poblaciones determinan en gran medida el rendimiento del proceso y la productividad de metano alcanzada. En este contexto, el estiércol ovino actúa como una fuente natural de microorganismos metanogénicos, facilitando la inoculación y adaptación del sistema experimental. Su incorporación favorece el establecimiento de comunidades

microbianas activas, reduce el tiempo de latencia y contribuye a una transición más estable hacia condiciones óptimas de producción de biometano (Song et al., 2019).

2.11. Relacion carbono/nitrógeno (C/N)

2.11.1. Importancia

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es un parámetro fundamental para la estabilidad del proceso de digestión anaerobia, ya que influye directamente en el equilibrio metabólico de los microorganismos. Valores comprendidos entre 20:1 y 30:1 se consideran óptimos para favorecer una actividad microbiana eficiente y una producción sostenida de metano. Cuando la relación C/N es demasiado baja, puede generarse acumulación de amoníaco por exceso de nitrógeno; en cambio, si es demasiado alta, puede producirse una limitación de nitrógeno que restrinja el crecimiento microbiano. Investigaciones recientes en sistemas de codigestión señalan que el ajuste adecuado de la relación C/N mediante la combinación estratégica de distintos sustratos mejora la estabilidad del proceso y aumenta el rendimiento específico de metano. La optimización de este parámetro contribuye a una conversión más eficiente de la materia orgánica y a una mayor productividad energética del sistema anaerobio. (Zhang et al., 2023).

2.11.2. Ajuste de C/N mediante codigestión

El estiércol ovino aporta nitrógeno y compuestos con capacidad amortiguadora que contribuyen a mantener la estabilidad del pH dentro del digestor, favoreciendo un entorno adecuado para el desarrollo de las comunidades microbianas. Este efecto tampón ayuda a contrarrestar posibles descensos de pH derivados de la acumulación de ácidos grasos volátiles, preservando el equilibrio microbiológico durante la digestión anaerobia. En contraste, la melaza y el suero de leche proporcionan carbono fácilmente degradable, lo que estimula la

actividad fermentativa y la formación de intermediarios metabólicos necesarios para la metanogénesis. La combinación de estos sustratos permite mantener un balance nutricional adecuado, optimizando la relación carbono/nitrógeno y favoreciendo una conversión más eficiente de la materia orgánica en metano, incrementando así el rendimiento energético del sistema. (Espín Valladares et al., 2023).

2.12. Inhibidores del proceso anaerobio

2.12.1. Inhibidores por ácidos grasos volátiles (AGV)

La acumulación excesiva de ácidos grasos volátiles (AGV) dentro del digestor puede generar una disminución considerable del pH, lo que afecta directamente la actividad de las arqueas metanogénicas y, por consiguiente, reduce la producción de metano. Estas arqueas son especialmente sensibles a variaciones bruscas de acidez, por lo que un descenso sostenido del pH puede provocar desequilibrios en el proceso y pérdida de eficiencia energética. Este fenómeno se presenta con mayor probabilidad cuando existe una sobrecarga orgánica, particularmente en sustratos con alto contenido de azúcares fácilmente fermentables, como el suero de leche y la melaza. En tales condiciones, la etapa de acidogénesis ocurre de manera acelerada, generando AGV a un ritmo superior al que pueden ser consumidos en la metanogénesis, lo que incrementa el riesgo de acidificación e inestabilidad operativa del sistema anaerobio. (Chen et al., 2008).

2.12.2. Inhibición por amoníaco

Altas concentraciones de nitrógeno en el sustrato pueden propiciar la formación de amoníaco libre (NH_3), particularmente cuando el sistema opera a valores elevados de pH y temperatura. El amoníaco libre es más tóxico que el ion amonio (NH_4^+) y puede afectar directamente la actividad de las arqueas metanogénicas, responsables de la etapa final de

producción de metano. Como consecuencia, se produce una disminución en la tasa de metanogénesis, inestabilidad del proceso y reducción del rendimiento energético. Por esta razón, estudios recientes señalan que en sistemas de codigestión es fundamental controlar la proporción de estiércol u otros residuos ricos en nitrógeno para evitar acumulaciones excesivas de amoníaco. Mantener concentraciones dentro de rangos tolerables permite preservar la actividad microbiana, garantizar la estabilidad del biodigestor y asegurar una producción eficiente y sostenida de biometano. (Jiang y otros, 2019).

2.13. Balance de materia y relación DQO–metano

2.13.1. Conversión de solidos volátiles

Durante la digestión anaerobia, una parte de los sólidos volátiles (SV), que constituyen la fracción orgánica biodegradable del sustrato, es transformada en biogás por la acción de microorganismos anaerobios, mientras que la fracción restante permanece en el digestato como material estabilizado o no degradado. Esta transformación refleja el grado de aprovechamiento de la materia orgánica disponible en el sistema. El análisis de la remoción de SV permite determinar el nivel de degradación alcanzado y evaluar la eficiencia del proceso, ya que existe una relación directa entre la reducción de sólidos volátiles y la producción de metano. Por ello, este parámetro resulta fundamental para estimar la conversión energética del sistema y comparar el desempeño de distintos tratamientos o mezclas de sustratos en estudios experimentales. (Filer et al., 2019).

2.13.2. Relación teórica DQO–producción de metano

Bajo condiciones estándar, se estima que la eliminación de 1 gramo de demanda química de oxígeno (DQO) puede generar aproximadamente 0,35 litros de metano (CH_4), valor derivado de la relación estequiométrica entre la oxidación de la materia orgánica y la

producción de gas en procesos anaerobios. Este factor teórico es ampliamente utilizado en estudios de digestión anaerobia para vincular la remoción de carga orgánica con la generación potencial de biogás. La aplicación de este coeficiente permite establecer una relación directa entre los resultados de los análisis fisicoquímicos del sustrato y su capacidad de producción energética. De esta manera, es posible realizar estimaciones preliminares del volumen de metano esperado y convertirlo posteriormente en unidades energéticas, facilitando la evaluación técnica y comparativa de distintos tratamientos o mezclas de sustratos. (Rocha et al., 2024).

2.14. Impacto ambiental y sostenibilidad

2.14.1. Reducción de emisiones

La digestión anaerobia permite capturar y valorizar el metano que, en condiciones naturales, sería liberado a la atmósfera durante la descomposición de residuos pecuarios y agroindustriales, evitando así la emisión de un gas con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el del dióxido de carbono. Este aprovechamiento controlado reduce las emisiones difusas asociadas al manejo inadecuado de residuos orgánicos y contribuye a una gestión ambiental más eficiente. Al transformar este metano en energía útil, ya sea en forma de electricidad, calor o biometano, se disminuye la dependencia de combustibles fósiles y se promueve una matriz energética más limpia. De esta manera, la digestión anaerobia no solo actúa como tecnología de tratamiento de residuos, sino también como una herramienta estratégica para la mitigación del cambio climático y el fortalecimiento de sistemas energéticos sostenibles. (Liebetrau et al., 2022).

2.14.2. Economía circular

El aprovechamiento del suero de leche, la melaza y el estiércol ovino mediante digestión anaerobia permite transformar residuos orgánicos con alta carga contaminante en una fuente de energía renovable. Este proceso reduce el impacto ambiental asociado a su disposición inadecuada y contribuye a la sustitución parcial de combustibles fósiles, al generar biogás y posteriormente biometano con potencial para aplicaciones térmicas y eléctricas. Además, la digestión anaerobia produce digestato, un subproducto con contenido significativo de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, que puede emplearse como biofertilizante. Su utilización favorece el reciclaje de nutrientes, el cierre de ciclos productivos y el fortalecimiento de la sostenibilidad en sistemas agroindustriales, promoviendo un modelo basado en principios de economía circular. (Liebetrau et al., 2022).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de investigación

Este estudio es de tipo experimental y cuantitativo, ya que se realizarán ensayos controlados en laboratorio para evaluar la producción de biometano a partir de la digestión anaerobia de mezclas de suero de leche, melaza y estiércol ovino (Rojas y Salazar, 2021; Reyes y Cevallos, 2023). La investigación se desarrollará en condiciones mesofílicas, permitiendo la observación y medición de variables específicas relacionadas con la producción de biogás (López y Escobar, 2022). El alcance será explicativo, ya que se buscará analizar y comprender el efecto de la composición de los sustratos sobre el rendimiento del proceso, estableciendo relaciones causa-efecto en la generación de biometano.

3.2. Ubicación del lugar de estudio

Esta investigación se desarrollará en el laboratorio de Bioprocesos pertenecientes a la carrera de Agroindustria de la Universidad Técnica del Norte, localizadas en la ciudad de San

Miguel de Ibarra, provincia de Imbabura, cuyas coordenadas geográficas son 0° 21’ 46” de latitud norte y 78° 7’ 51” de longitud oeste (INAMHI, 2022).

3.3. Materiales e insumos, equipos, reactivos, software

Se necesitarán los siguientes materiales, equipos y software para la investigación.

Tabla 1. *Materiales y equipos*

Materia prima	Reactivos de laboratorio	Materiales	Equipos	Software
Suero de leche	Hidróxido de sodio (NaOH)	Frascos Boeco 500 ml	Equipo AMPTS II	Microsoft Excel
Melaza	Agua destilada	Frascos Boeco 250 ml	Balanza Analítica	
Estiércol ovino	Fenolftaleína (indicador de pH)	Probetas	Termómetro de Mercurio	
		Vaso de precipitación	Medidor de pH (Potenciómetro)	

3.4. Métodos, técnicas e instrumentos

A continuación, se detallan los métodos, técnicas e instrumentos empleados en la recolección y análisis de información, con el propósito de cumplir los objetivos propuestos en la presente investigación.

3.4.1. Caracterización de las materias primas

Se realizó un análisis inicial de las materias primas para determinar los siguientes parámetros:

Tabla 2. *Caracterización de la materia prima*

Análisis	Normativa	Método

Sólidos volátiles	NTE INEN 2 153	APHA 2540 E
Solidos totales	NTE INEN 014	APHA 2540 B
DQO	NTE INEN 1203	APHA 5520 D
pH	NTE- INEN 526	Potenciómetro digital
Cenizas	APHA 2540 E / ASTM D482	Mufla a 550 °C
Análisis Elemental (CHNS-O)	ASTM D5291 / ISO 10694	Analizador elemental

- **Sólidos Volátiles (SV)**

La determinación de los sólidos volátiles se realizó siguiendo el método establecido en la norma NTE INEN 2153 y el estándar APHA 2540 E. El procedimiento consistió en secar la muestra a 105 °C para eliminar el contenido de humedad y, posteriormente, incinerarla a 550 °C en una mufla, con el fin de cuantificar la fracción orgánica presente mediante la pérdida de masa.

- **Sólidos Totales (ST)**

La determinación de los sólidos totales se llevó a cabo conforme a lo establecido en la norma NTE INEN 014 y el método APHA 2540 B. El procedimiento consistió en secar una alícuota representativa de la muestra en una estufa a 103–105 °C, hasta alcanzar peso constante. El residuo restante se consideró como sólidos totales, los cuales incluyen tanto la fracción orgánica como la inorgánica presente en la muestra.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Se realizará mediante el método del dicromato en medio ácido, siguiendo las directrices del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

- **pH**

Este análisis se efectuará empleando un medidor de pH digital. El método consiste en sumergir brevemente el sensor en la muestra correspondiente, hasta obtener una lectura constante. Con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados, se realizarán tres mediciones por cada muestra analizada.

- **Cenizas**

Este análisis se realizará conforme a los métodos APHA 2540 E y ASTM D482. Consiste en incinerar una muestra previamente seca en una mufla a una temperatura de 550 °C hasta alcanzar peso constante. El residuo inorgánico resultante se considerará como contenido de cenizas. Este parámetro permite estimar la fracción mineral de la muestra.

- **Análisis Elemental (CHNS-O)**

El análisis elemental se efectuará siguiendo los métodos normalizados ASTM D5291 e ISO 10694. Se utilizará un analizador elemental automático, que quema la muestra en un ambiente controlado y cuantifica los elementos carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O). Esta información es esencial para la aplicación de la fórmula de Buswell y Mueller, la cual permite estimar la producción teórica de biogás y otros gases como el hidrógeno.

3.4.2. Experimentación de la digestión anaerobia para la obtención de metano a partir de mezclas controladas de suero de leche, melaza y estiércol ovino

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico, se llevó a cabo el desarrollo experimental correspondiente, considerando las siguientes condiciones de necesarias para el proceso:

- **Reactor anaeróbico**

Para el desarrollo experimental, se utilizó un sistema tipo AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System), diseñado específicamente para medir la producción de metano en procesos de digestión anaerobia a escala de laboratorio. Este equipo permite una evaluación precisa y automatizada de la actividad metanogénica, facilitando la recolección de datos sobre el volumen y la calidad del biogás generado.

La eficiencia del reactor se analizó en función de su capacidad para procesar mezclas controladas de suero de leche, melaza y estiércol ovino bajo condiciones mesofílicas. Al mantener un control riguroso de parámetros como temperatura, agitación y volumen de sustrato, el sistema AMPTS II garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos, lo cual es esencial para determinar el rendimiento energético y la estabilidad del proceso. Su diseño permite registrar variaciones en la generación de metano asociadas a cambios en la composición de los sustratos, convirtiéndolo en una herramienta clave para comparar el comportamiento de distintas formulaciones.



Figura 1.
Equipo AMPTS II

- **Adaptación del inóculo**

Se empleo estiércol ovino fresco como inóculo para el proceso de digestión anaerobia, dada su reconocida eficacia por su elevada carga microbiana metanogénica. Antes del inicio del ensayo, el estiércol fue sometido a un proceso de preincubación durante siete días bajo condiciones mesofílicas (35 ± 2 °C), con el fin de activar la microbiota anaerobia presente y

mejorar la conversión de la materia orgánica a metano durante la fase experimental (García, 2015). El estiércol ovino, al ser combinado con sustratos ricos en carbohidratos como el suero de leche y la melaza, puede potenciar la eficiencia del proceso al actuar como un inóculo estabilizador y catalizador biológico (Díaz et al. 2015).

3.4.2.1.Diseño Experimental

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con 1 tratamiento y 45 repeticiones, totalizando 90 unidades experimentales. Las mezclas fueron formuladas manteniendo una carga orgánica equivalente en todos los tratamientos, y se evaluarán bajo condiciones controladas de temperatura, volumen y tiempo de retención.

Este tipo de diseño resulta adecuado para estudios de digestión anaerobia, ya que permite una evaluación estadísticamente válida del efecto de los diferentes sustratos, y genera una base robusta de datos útil para aplicaciones posteriores como el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial (Esposito et al., 2021).

3.4.2.2. Mezclas controladas de sustratos

Para este estudio, se consideró como sustrato a una mezcla compuesta por suero de leche, melaza y estiércol ovino, con el propósito de evaluar su comportamiento en la producción de biometano a través de digestión anaerobia. Las mezclas controladas se formularon manteniendo constante el porcentaje de estiércol ovino en todos las muestras, mientras que las proporciones de suero de leche y melaza se ajustarán en distintos niveles (Cordova, 2025). Esta estrategia permitió analizar el efecto de los sustratos ricos en carbono sobre el proceso, manteniendo una base inoculante estable en todas las repeticiones, tal como recomiendan autores como, quienes destacan la importancia de mantener constante el inóculo para garantizar comparabilidad en ensayos de codigestión anaerobia.

3.4.2.3. Características de las unidades fundamentales

El experimento se desarrolló utilizando cinco formulaciones distintas de mezclas de residuos, cada una con un volumen total uniforme de 300 mL, independientemente de la proporción individual de los componentes que las integran. Todas las unidades experimentales contienen 100 ml de inóculo que fueron previamente adaptado con suero de leche y melaza de caña de azúcar para una óptima fermentación

3.4.2.4. Factor de estudio

Como factores de estudio se pretende trabajar la biodigestión de suero de leche y estiercol. Debido a que este PIC está asociado al proyecto de investigación del grupo PROAGRORED, los datos alcanzados van a ser posteriormente utilizados para el entrenamiento de un modelo por inteligencia artificial. Para asegurar la confiabilidad del modelo, se conoce que es necesario tener al menos 60 réplicas de cada experimento. Como la universidad sólo cuenta con un biodigestor donde se pueden tener hasta 15 réplicas simultáneas, y el proceso puede demorar hasta un mes. Es necesario entonces sólo contar con con 45 réplicas de las 60 requeridas por tratamiento.

Es así como para esta investigación se trabajó con la biodigestión del suero de leche puro y por otro lado la biodigestión de la melaza, de esta manera se podrá alimentar la base de datos del modelo que se desea desarrollar.

Tabla 3. *Niveles del factor de estudio.*

Factor A	Niveles
S:M	100:0

La tabla muestra el factor A, correspondiente a las proporciones de Suero: Melaza (S:M), expresadas en porcentajes de 100 % y 0 %. Donde:

Tabla 4. *Mezclas controladas en porcentaje.*

Muestra	Suero de leche (%)	Melaza (%)
T1	100	0

3.4.2.5. Control de la temperatura

Durante el proceso de digestión anaerobia, el control de temperatura es un factor crítico para garantizar la actividad metabólica de los microorganismos involucrados, especialmente los metanógenos. En este estudio, la digestión se llevó a cabo bajo condiciones mesofílicas, con una temperatura controlada de 35 ± 2 °C, ya que este rango favorece una alta eficiencia en la conversión de materia orgánica en metano (Esposito et al., 2021). La temperatura se mantuvo constante mediante el uso de un baño térmico o incubadora con regulación automática, lo cual evita fluctuaciones que puedan inhibir la actividad microbiana o generar tiempos de retención inconsistentes. Según López y Escobar (2022), variaciones térmicas superiores a ±2 °C pueden provocar una reducción significativa en la producción de biogás, razón por la cual se monitoreo constantemente mediante termómetros digitales calibrados.

3.4.2.6. Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) representa el período en que los sustratos permanecen dentro del reactor y es crucial para una adecuada degradación de la materia orgánica. En este experimento, se establecerá un TRH de 20 días, lo cual ha sido reportado como eficaz en co-digestiones de residuos agroindustriales con alto contenido de azúcares y proteínas (Montenegro y Rojas, 2019). Este tiempo permitirá observar la evolución de la producción de biogás y la estabilidad del proceso a lo largo de la investigación.

3.4.2.7. Diagrama de proceso

Considerando la complejidad de los procesos anaerobios, se tomará como guía el siguiente esquema, el cual será detallado más adelante con base en los datos obtenidos durante el experimento:

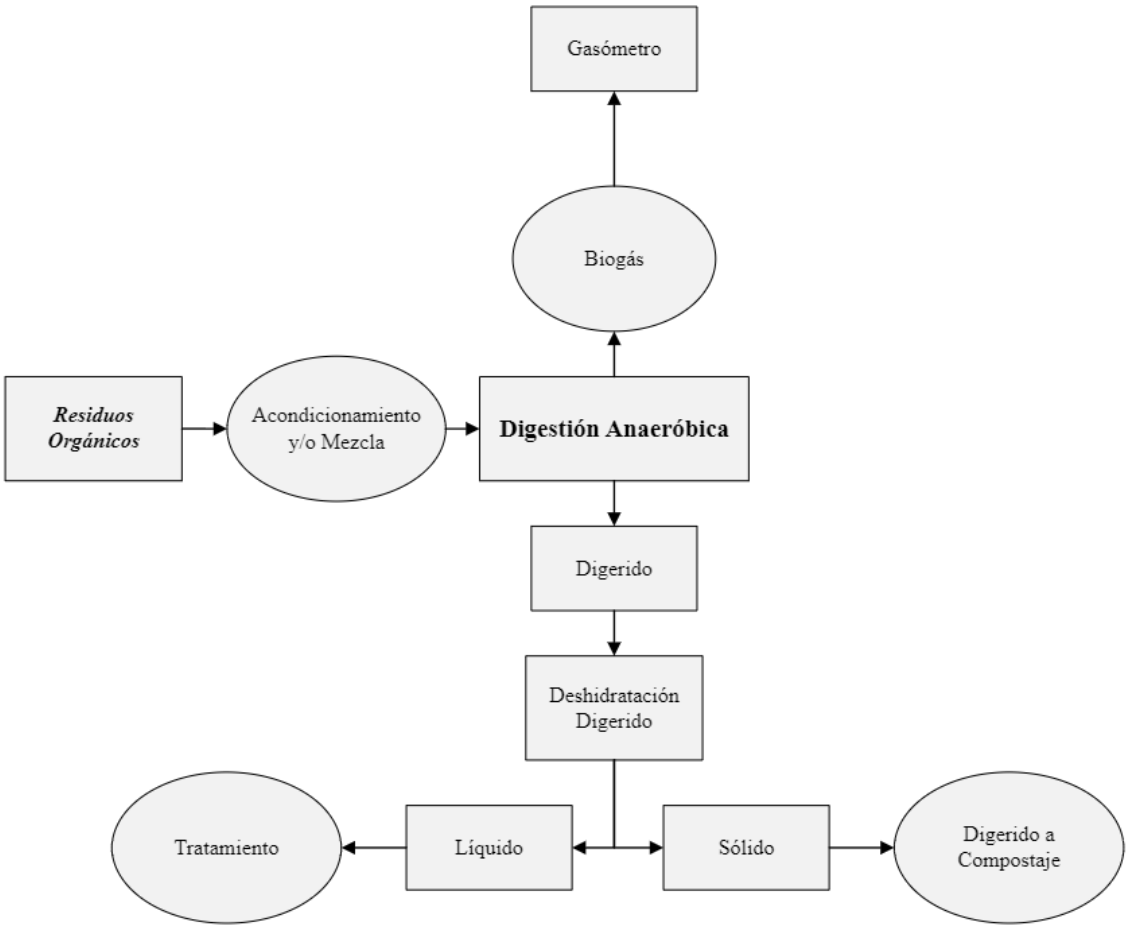


Figura 2.
Diagrama de Flujo Digestión Anaeróbica

3.4.3. Cuantificación teórica de la producción energética

Una vez obtenidos los resultados del proceso de digestión anaerobia, es fundamental estimar el potencial energético generado, a fin de valorar la viabilidad de las mezclas como fuente renovable de energía.

3.4.3.1. Contenido de metano (CH_4)

Para estimar el contenido energético del metano producido, se utilizó el volumen acumulado de metano (CH_4) obtenido experimentalmente mediante el sistema AMPTS II, expresado en mililitros normales (NmL). En primer lugar, el volumen fue convertido a metros cúbicos normales (Nm^3) mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1. *Conversión del volumen de metano de Nml Nm3*

$$V_{Nm^3} = \frac{V_{Nml}}{1000000} \quad (1)$$

Donde:

- V_{Nm^3} : volumen de metano en metros cúbicos.
- V_{Nml}: volumen de metano en mililitros.

Esta metodología permite cuantificar el potencial bioenergético del sistema, aportando información clave sobre la eficiencia de conversión de los residuos en metano. Estudios como los de Li et al. (2020) y Kafle & Kim (2013) han validado este enfoque para sustratos agroindustriales diversos.

3.4.3.2. Producción de Energía

Se estimó la producción energética a partir del volumen de biogás generado en cada muestra. Para ello, se calculará la fracción de metano contenida en el biogás, y con base en su poder calorífico inferior (PCI), se determinará la energía potencial recuperable. Esta etapa permitirá establecer comparaciones entre tratamientos respecto a su eficiencia energética.

Ecuación 2. *Fracción de metano contenida en el biogás*

$$E = V_{CH4} \times PCI_{CH4} \quad (2)$$

Donde:

E: Energía teórica generada (MJ)

PCI_{CH4}: Poder calorífico inferior del metano = 35,8 MJ/m³ (Khan et al., 2020

3.4.3.3. Conversión de energía

Ecuación 3. *Conversión de energía*

$$E_{kWh} = \frac{E_{MJ}}{3.6} \quad (3)$$

La energía teórica obtenida permitirá estimar el rendimiento energético de cada mezcla de sustratos, facilitando el análisis comparativo y la optimización del proceso en condiciones futuras (Bharathiraja et al., 2020).

3.4.3.4. Procesamiento de la información

Los datos obtenidos a partir de la experimentación de digestión anaerobia serán procesados mediante herramientas estadísticas y cálculos energéticos. Para el análisis de los resultados se empleará Microsoft Excel, que permitirá la organización, tabulación y graficación de los valores registrados en cada unidad experimental. Asimismo, se realizarán comparaciones entre tratamientos aplicando medidas de tendencia central y dispersión. Para la cuantificación teórica de la energía, se utilizarán fórmulas específicas que relacionan el volumen de metano producido con su poder calorífico. Este análisis permitirá determinar el rendimiento energético de cada mezcla, facilitando la interpretación de resultados y la optimización del proceso.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo expone los resultados obtenidos de acuerdo con los tres objetivos específicos planteados en la investigación. En primer lugar, se presenta la caracterización fisicoquímica de las materias primas empleadas en el proceso de digestión anaerobia. Posteriormente, se analiza el comportamiento experimental de la producción de metano registrada mediante el sistema AMPTS II. Finalmente, se determina el potencial teórico de generación de metano y su correspondiente conversión energética en megajulios y kilovatios hora. Para garantizar comparaciones consistentes, las mediciones automáticas efectuadas cada 15 minutos fueron consideradas observaciones sucesivas de cada reactor y no repeticiones experimentales independientes.

4.1. Caracterización las propiedades físico-químicas de los sustratos destinados al proceso de digestión anaerobia.

Antes de iniciar con el proceso de digestión anaeróbica se realizaron pruebas previas para determinar las condiciones de fermentación que permitan obtener el mayor rendimiento durante el proceso de producción de biogás, por esta razón, mediante bibliografía y experimentación se evaluó solidos volátiles, solidos totales, demanda química de oxígeno (DQO), densidad y pH inicial.

Tabla 5. *Resultados de la caracterización de la materia prima*

Parámetro	Unidad	Suero	Melaza	Estiércol ovino
Sólidos volátiles	g/L	164,24	726,9	6,73
Sólidos totales	g/L	237,70	824,72	12,4
DQO	g/L	0,64	8,14	1,1
Densidad	g/ml	0,98	1,2	0,91

pH	-	6,9	5,6	3,4

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis físico químico de la materia prima, se puede indicar que los mismos se encuentran similares a los que se presentan en el estudio denominado evaluación de la producción de biogás a partir del suero lácteo a escala laboratorio que pertenece al autor Ramírez et al. (2014) en el que menciona que los análisis de las materias primas tanto como en sólidos volátiles, sólidos totales, pH y DQO intervienen en el proceso de - 45 - digestión anaeróbica. Por tal razón los análisis de suero de leche de la microempresa artesanal en Zuleta presentaron 164,24 g/L sólidos volátiles que de acuerdo a la investigación realizada por (Arranz et al. 2014) está dentro del rango 50 – 250 g/L que ocasionan estabilidad al proceso de digestión anaeróbica, ya que un valor debajo de este rango produciría desestabilización y de esta manera disminución en la producción de biogás. Los sólidos totales para el suero reflejan un valor de 237,70 g/L que implica la existencia de materia orgánica para la degradación en la fermentación anaeróbica. De acuerdo con (Arranz et al., 2014) la Demanda Química de Oxigeno de suero de leche está en un rango de 0,6 – 0,8 g/L es así que el suero utilizado es apto para la fermentación anaeróbica ya que presentó 0,64 g/L de DQO. Por otra parte, la melaza reflejó un valor alto de sólidos volátiles de 726,94 g/L que se encuentra similar a la investigación sobre la producción de biogás a partir de la biodegradación anaeróbica de la vinaza generada por las destilerías de alcohol y su aprovechamiento energético como combustible de calderas bajo gases invernadero por el autor (López, 2019) en donde menciona que teóricamente la materia orgánica debe ser convertida a metano. Es importante mencionar que tanto el resultado de sólidos totales y demanda química de oxígeno son valores que se encuentran en los rangos establecidos para la fermentación anaeróbica.

4.2. Experimentación de la digestión anaerobia para la obtención de metano a partir de mezclas controladas de suero de leche, melaza y estiércol ovino.

El segundo objetivo específico consistió en experimentar la digestión anaerobia para la obtención de metano a partir de las formulaciones controladas de suero de leche, melaza y estiércol ovino. La producción fue registrada automáticamente mediante el equipo AMPTS II a intervalos de 0,25 horas.

4.2.1. Depuración y disponibilidad de las unidades experimentales

El reporte original estuvo configurado con quince celdas, distribuidas en cinco tratamientos identificados como T1, T2, T3, T4 y T5, con tres posiciones asignadas inicialmente a cada tratamiento. La revisión de los registros mostró que no todas las celdas generaron series aprovechables.

Tabla 6. *Disponibilidad de las unidades experimentales después de la depuración del reporte AMPTS II*

Tratamiento	Celdas configuradas	Series válidas ≥ 24 h	Celdas sin datos	Series incompletas < 24 h
T1	3	1	2	0
T2	3	1	2	0
T3	3	2	1	0
T4	3	3	0	0
T5	3	1	1	1
Total	**15**	**8**	**6**	**1**

Nota. Se consideraron válidas para el análisis descriptivo las series con al menos 24 horas de registro. La serie T5-R3 presentó únicamente 1,75 horas y fue excluida de las comparaciones. Las series M1-M5 encontradas en el reporte fueron identificadas como copias de registros previamente existentes y no se contabilizaron como tratamientos ni repeticiones adicionales. Elaboración propia a partir del archivo AMPTS II depurado.

Los resultados de depuración evidenciaron un diseño desbalanceado debido a la pérdida o ausencia de registros en siete de las quince posiciones inicialmente configuradas. Por esta razón, las mediciones efectuadas cada 15 minutos no fueron utilizadas como repeticiones independientes, pues corresponden a observaciones sucesivas del mismo reactor.

El tratamiento T4 presentó la mayor integridad de información, debido a que conservó las tres series originalmente asignadas. T3 conservó dos unidades, mientras T1, T2 y T5 dispusieron solamente de una serie válida para comparaciones con una duración superior a 24 horas. Esta condición impide efectuar, con este archivo por sí solo, un ANOVA convencional de cinco tratamientos con tres repeticiones independientes completas.

4.2.2. Producción acumulada de metano a un tiempo común de 53,25 horas

Debido a que las series experimentales finalizaron en tiempos diferentes, se seleccionó un tiempo común de 53,25 horas, equivalente aproximadamente a 2,22 días. Este punto correspondió al mayor tiempo compartido por las ocho series con duración igual o superior a 24 horas y permitió efectuar una comparación descriptiva bajo una misma duración experimental.

Tabla 7. *Producción de metano de los tratamientos a las 53,25 horas de digestión anaerobia*

Tratamiento	n	CH_4 acumulado (NmL)	Rendimiento específico (NmL CH_4/g DQO)	Rmax hasta 53,25 h (NmL/h)
T1	1	15,00	0,162	0,50
T2	1	138,30	1,590	29,30
T3	2	98,40 ± 66,47	1,131 ± 0,764	20,85 ± 4,45
T4	3	89,47 ± 10,64	1,028 ± 0,122	32,03 ± 10,30
T5	1	92,70	1,066	44,00

Nota. Los valores se calcularon a las 53,25 horas, que constituyen el mayor tiempo común disponible entre las ocho series con al menos 24 horas de registro. Los resultados de T3 y T4 se expresan como media ± desviación estándar. Para T1, T2 y T5 no se calculó desviación estándar debido a que únicamente existió una serie válida por tratamiento. Rmax = tasa máxima de producción de metano observada dentro de las primeras 53,25 horas. Los rendimientos se calcularon con la DQO registrada por el sistema AMPTS II.

A las 53,25 horas, T2 presentó la mayor producción acumulada de metano, con 138,30 NmL, seguido por T3 con una media de 98,40 NmL, T5 con 92,70 NmL y T4 con 89,47 NmL. T1 mostró el menor volumen acumulado, con únicamente 15,00 NmL.

Cuando la producción fue normalizada por la DQO del sustrato, T2 conservó el mayor rendimiento específico, con 1,590 NmL CH_4/g DQO. T3 alcanzó 1,131 NmL CH_4/g DQO, T5 obtuvo 1,066 NmL CH_4/g DQO y T4 registró 1,028 NmL CH_4/g DQO. T1 presentó nuevamente el menor rendimiento, con 0,162 NmL CH_4/g DQO.

La dispersión observada entre las dos unidades disponibles de T3 fue considerable, dado que su producción media fue de 98,40 ± 66,47 NmL. En contraste, T4 presentó una menor variación relativa entre sus tres unidades, con 89,47 ± 10,64 NmL. Este resultado sugiere una respuesta más homogénea de T4 durante las primeras 53,25 horas, aunque no permite afirmar superioridad estadística.

En relación con la tasa máxima de producción durante el período común, T5 registró 44,00 NmL/h. Sin embargo, este máximo apareció aproximadamente a las 0,25 horas, por lo que debe interpretarse como una respuesta inicial y no como una velocidad sostenida durante la digestión. T4 presentó una media de 32,03 ± 10,30 NmL/h, mientras T2 alcanzó 29,30 NmL/h.

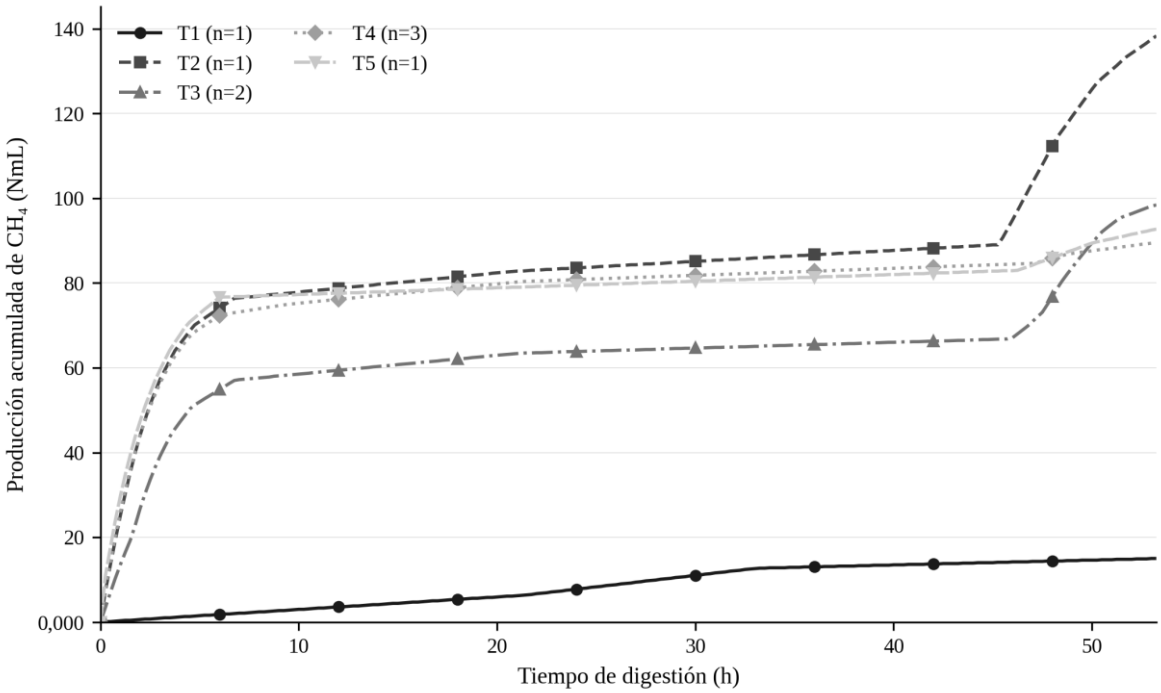


Figura 3.

Evolución de la producción acumulada de metano durante las primeras 53,25 horas

Nota. El eje horizontal representa el tiempo de digestión en horas y el eje vertical la producción acumulada de CH_4 en NmL. Para T3 y T4 se presentan las medias de las unidades válidas; T1, T2 y T5 corresponden a una única serie válida. Las observaciones registradas cada 15 minutos representan medidas repetidas de un mismo reactor y no repeticiones experimentales independientes.

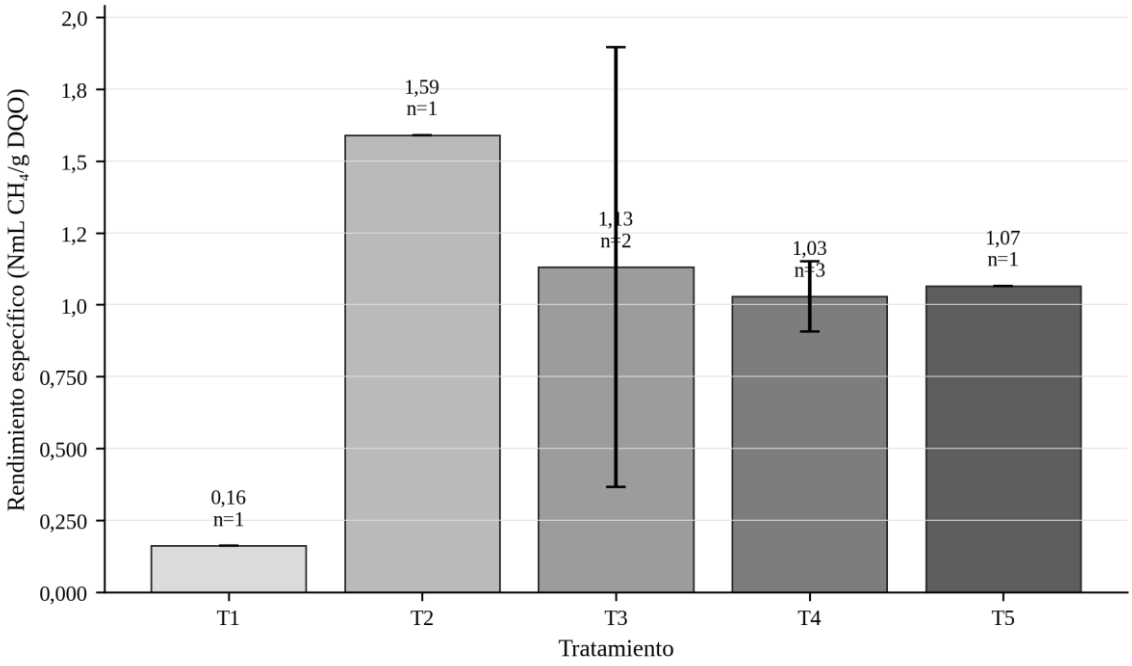


Figura 4.

Rendimiento específico de metano de los tratamientos a las 53,25 horas

Nota. Las barras representan el rendimiento específico medio de cada tratamiento. Para T3 y T4 se muestran barras de error correspondientes a una desviación estándar. T1, T2 y T5 no presentan barras de error debido a que cuentan con una única unidad válida.

3.2.3. Comportamiento de las series hasta el último registro disponible

Aunque el tiempo común permite comparar los tratamientos bajo una misma duración, también se examinó el último registro disponible de cada reactor para determinar si las curvas habían alcanzado una posible fase de estabilización.

Tabla 8. *Producción acumulada de metano al último tiempo disponible de cada unidad experimental válida*

Unidad	Tiempo final (h)	CH_4 final (NmL)	Rendimiento (NmL CH_4/g DQO)	Incremento en las últimas 24 h (%)
T1-R1	366,50	260,80	2,814	36,62
T2-R3	308,75	1.176,00	13,517	0,19
T3-R1	399,50	399,90	4,597	11,60
T3-R3	53,25	145,40	1,671	46,29
T4-R1	97,75	336,20	3,864	74,12
T4-R2	104,25	672,70	7,732	77,43
T4-R3	113,50	651,80	7,492	82,10
T5-R1	164,25	185,40	2,131	7,23

Nota. Los tiempos finales no son iguales entre las unidades y, por esta razón, los volúmenes de esta tabla no deben utilizarse para establecer directamente cuál tratamiento produjo mayor metano. El porcentaje de las últimas 24 horas expresa cuánto del volumen final registrado se generó durante ese período y se emplea únicamente como indicador descriptivo de la evolución de la curva.

T2-R3 alcanzó 1.176,00 NmL a las 308,75 horas y únicamente produjo el 0,19 % de su volumen final durante las últimas 24 horas registradas. Este comportamiento es compatible con una curva que se encontraba próxima a una fase de estabilización al finalizar su registro.

T5-R1 presentó un incremento de 7,23 % durante sus últimas 24 horas y T3-R1 alcanzó 11,60 %. Estos resultados muestran una reducción de la producción hacia el final disponible, aunque no permiten aplicar por sí mismos un criterio definitivo de finalización del ensayo.

Las tres unidades de T4 mostraron un comportamiento diferente. Entre el 74,12 % y el 82,10 % del volumen final registrado en estas series se generó durante sus últimas

24 horas. Por tanto, las curvas todavía atravesaban una fase de incremento pronunciado cuando terminó el registro disponible. Sus valores de 336,20; 672,70 y 651,80 NmL no deben considerarse BMP finales.

T1-R1 tampoco presentó una estabilización clara, debido a que el 36,62 % de su volumen acumulado se produjo durante las últimas 24 horas. Esta observación confirma que utilizar únicamente el último valor disponible de cada curva introduciría un sesgo importante por la diferencia en la duración de las series.

Respuesta al segundo objetivo específico

El segundo objetivo fue cumplido mediante el registro experimental de la producción de metano en el sistema AMPTS II. A un tiempo comparable de 53,25 horas, T2 presentó el mayor volumen acumulado y el mayor rendimiento específico entre los tratamientos disponibles. T4 mostró la menor dispersión entre los tratamientos que conservaron más de una repetición válida. La información disponible demuestra diferencias descriptivas entre las formulaciones, aunque la pérdida de unidades experimentales impide establecer diferencias estadísticamente significativas mediante un ANOVA convencional con este único archivo.

4.3. Cuantificar teóricamente la producción energética potencial del biometano obtenido

El tercer objetivo específico se orientó a cuantificar teóricamente la producción energética potencial del metano obtenido. Para esta finalidad se utilizó la cantidad de DQO registrada para cada unidad experimental y la relación teórica de 0,35 L CH_4 por gramo de DQO, equivalente a 350 NmL CH_4/g DQO (Rocha et al., 2024).

La producción teórica de metano se calculó mediante la siguiente expresión:

$$CH_4 \text{ teórico (NmL)} = \text{DQO del sustrato (g)} \times 350 \text{ NmL } CH_4/\text{g DQO}$$

La eficiencia relativa de conversión se obtuvo mediante:

$$\text{Eficiencia de conversión (\%)} = (CH_4 \text{ experimental} / CH_4 \text{ teórico}) \times 100$$

Para convertir el volumen de metano a energía se empleó un poder calorífico inferior de 35,8 MJ/m³:

$$\text{Energía (MJ)} = VCH_4 \text{ (NmL)} \times 10^{-6} \times 35{,}8$$

$$\text{Energía (kWh)} = \text{Energía (MJ)} / 3{,}6$$

4.3.1. Potencial teórico y energía asociada al tiempo común

Tabla 9. *Producción experimental, potencial teórico y energía de los tratamientos a las 53,25 horas*

Trat.	CH_4 exp. (NmL)	CH_4 teórico (NmL)	Conversión (%)	Energía exp. (MJ)	Energía exp. (kWh)	Energía teórica (MJ)	Energía teórica (kWh)
T1	15,00	32.434,50	0,046	0,000537	0,000149	1,1612	0,3225
T2	138,30	30.450,00	0,454	0,004951	0,001375	1,0901	0,3028
T3	98,40 ± 66,47	30.450,00	0,323	0,003523	0,000979	1,0901	0,3028
T4	89,47 ± 10,64	30.450,00	0,294	0,003203	0,000890	1,0901	0,3028
T5	92,70	30.450,00	0,304	0,003319	0,000922	1,0901	0,3028

Nota. Los cálculos experimentales corresponden al tiempo común de 53,25 horas. El potencial teórico se estimó a partir de 350 NmL CH_4/g DQO. T1 registró 92,67 g de DQO del sustrato y T2-T5 registraron 87,00 g según la configuración del reporte AMPTS II. El volumen experimental no fue corregido por un blanco de inóculo debido a que el archivo no identifica una unidad de control de manera inequívoca; por tanto, los valores no deben denominarse BMP neto.

El mayor aporte energético experimental a las 53,25 horas correspondió a T2, con 0,004951 MJ, equivalentes a 0,001375 kWh. T3 alcanzó una media de 0,003523 MJ, seguido de T5 con 0,003319 MJ y T4 con 0,003203 MJ. T1 presentó el menor valor, con 0,000537 MJ.

El potencial teórico calculado a partir de la DQO fue considerablemente superior al volumen recuperado durante las primeras 53,25 horas. Los tratamientos con una carga registrada de 87,00 g DQO presentaron un potencial máximo de 30.450 NmL CH_4 y 1,0901 MJ, equivalentes a 0,3028 kWh. Para T1, cuya carga registrada fue de 92,67 g DQO, el potencial ascendió a 32.434,50 NmL CH_4 y 1,1612 MJ.

Las eficiencias calculadas en este momento temprano del ensayo fueron inferiores al 0,5 %. T2 presentó el valor más elevado, con 0,454 %, seguido de T3 con 0,323 %, T5 con 0,304 %, T4 con 0,294 % y T1 con 0,046 %. Estos porcentajes no deben interpretarse como eficiencia final del proceso, debido a que 53,25 horas representan únicamente el período común seleccionado para realizar la comparación y varias curvas continuaron incrementándose después de dicho momento.

El comportamiento de T2 permite evidenciar esta diferencia temporal. A las 53,25 horas había acumulado 138,30 NmL, mientras al último registro disponible alcanzó 1.176,00 NmL a las 308,75 horas. Este último volumen equivale aproximadamente a 0,042101 MJ o 0,011695 kWh y representa una conversión equivalente al 3,862 % del potencial calculado a partir de la DQO registrada. Este dato tampoco debe utilizarse para comparar directamente T2 con las restantes formulaciones debido a las diferentes duraciones experimentales.

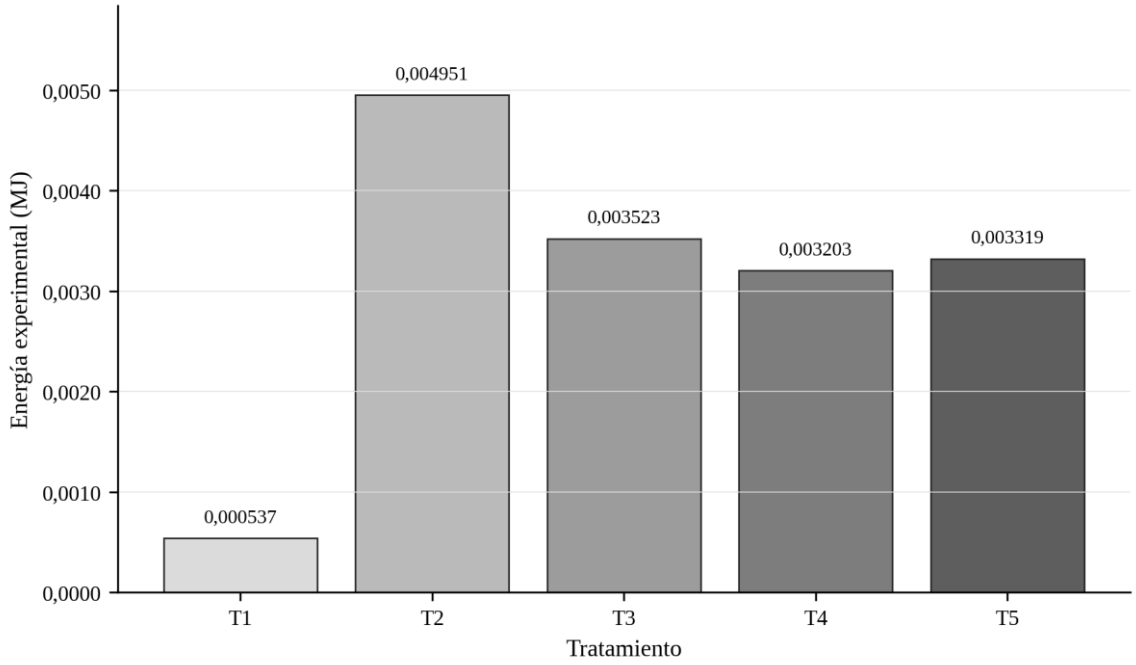


Figura 5.
Producción energética experimental de los tratamientos a las 53,25 horas

Nota. La energía fue calculada a partir del volumen acumulado de CH_4 registrado por AMPTS II y un poder calorífico inferior de 35,8 MJ/m³. Para T3 y T4 los valores corresponden a la media de las unidades válidas.

4.4. Contrastación de la hipótesis

La hipótesis alternativa plantea que la codigestión anaerobia de suero de leche, melaza y estiércol ovino genera una producción teórica significativa de biometano y energía aprovechable en función de las características fisicoquímicas de las materias primas. Por el contrario, la hipótesis nula plantea que la codigestión no genera una producción teórica significativa de biometano ni de energía aprovechable.

Los resultados experimentales demuestran que todas las unidades con registros válidos presentaron producción positiva de metano. A las 53,25 horas, los tratamientos alcanzaron valores comprendidos entre 15,00 y 138,30 NmL CH_4, mientras que la conversión energética osciló entre 0,000537 y 0,004951 MJ. A tiempos posteriores, determinadas unidades continuaron aumentando la producción; T2-R3 alcanzó 1.176,00 NmL y 0,042101 MJ.

Estos resultados son descriptivamente compatibles con la hipótesis alternativa, puesto que existe generación medible de metano y un potencial energético cuantificable. La parte literal de la hipótesis nula que implicaría ausencia de producción no coincide con los registros obtenidos.

Sin embargo, no es metodológicamente correcto afirmar que se demostró una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos, debido a que el conjunto de datos disponible presenta un número desigual e insuficiente de repeticiones independientes. T1, T2 y T5 solamente conservaron una unidad válida, T3 dispuso de dos y T4 de tres. Por esta razón, no se efectuó un ANOVA utilizando las mediciones de 15 minutos como repeticiones artificiales.

En consecuencia, la investigación aporta evidencia descriptiva a favor de la hipótesis alternativa en cuanto a la existencia de producción de metano y energía, pero la significancia estadística del efecto de los tratamientos deberá comprobarse cuando se disponga de repeticiones experimentales independientes suficientes y equilibradas.

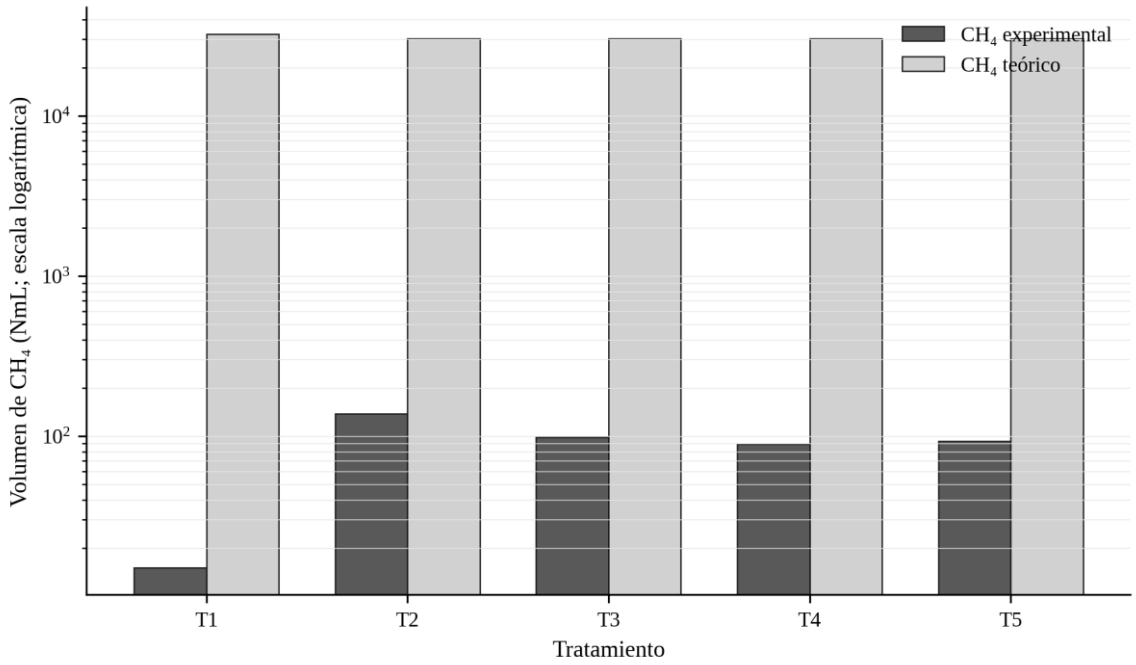


Figura 6.

Comparación entre el metano experimental y el potencial teórico calculado a partir de la DQO

Nota. El potencial teórico corresponde a 350 NmL CH_4/g DQO. El eje vertical utiliza una escala logarítmica debido a la diferencia de magnitud entre la producción experimental a las 53,25 horas y el potencial teórico. La figura representa el grado de conversión alcanzado durante el período común y no un rendimiento final del ensayo.

Respuesta al tercer objetivo específico

El tercer objetivo fue cumplido mediante la transformación de los volúmenes de metano registrados en valores de energía y mediante la estimación del potencial teórico asociado con la DQO incorporada. A las 53,25 horas, T2 presentó el mayor valor energético experimental con 0,004951 MJ y 0,001375 kWh. El potencial teórico de las unidades con 87,00 g DQO fue de 1,0901 MJ, mientras T1 presentó un potencial de

1,1612 MJ debido a su mayor carga registrada de DQO. Los resultados evidencian que la recuperación observada durante el período común correspondió todavía a una fracción reducida del potencial teórico.

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

La caracterización fisicoquímica del suero de leche y del estiércol ovino permitió determinar las propiedades de ambas materias primas como sustratos para la digestión anaerobia, evidenciando que presentan características adecuadas para la producción de biometano y su aprovechamiento con fines de generación de bioenergía.

La digestión anaerobia del suero de leche y estiércol ovino demostró el potencial de estos sustratos para la producción de biometano. Sin embargo, durante el desarrollo experimental se observó que varios reactores no presentaron producción de metano o mostraron un comportamiento irregular, por lo que el análisis se realizó con las cinco muestras que evidenciaron un proceso de digestión más consistente y continuo, permitiendo cumplir con los objetivos planteados.

La combinación de suero de leche y melaza aportó compuestos fácilmente fermentables, mientras que el estiércol ovino actuó como fuente de microorganismos metanogénicos, favoreciendo un efecto sinérgico en la producción de metano. Asimismo, la energía teórica obtenida, aunque a escala de laboratorio fue baja, demuestra el potencial del aprovechamiento de residuos agroindustriales para la generación de energía renovable.

La cuantificación teórica de la producción energética permitió estimar el potencial energético del biometano generado por las muestras analizadas. No obstante, la

variabilidad observada entre los reactores pone de manifiesto la importancia de controlar las condiciones experimentales y la calidad del inóculo, ya que estos factores pueden influir significativamente en el rendimiento de la digestión anaerobia.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda incrementar el número de réplicas experimentales y verificar previamente la actividad del inóculo y las condiciones de operación del sistema AMPTS II antes del inicio del ensayo, con el fin de minimizar la presencia de reactores sin producción de metano y mejorar la reproducibilidad de los resultados.

Asimismo, es importante mantener un control estricto de las condiciones de operación del sistema de digestión anaerobia, especialmente la temperatura, el pH y la homogeneidad de la mezcla, con el fin de mejorar la estabilidad del proceso y la producción de metano.

También, se debe evaluar en futuras investigaciones diferentes proporciones de suero de leche y estiércol ovino, así como la incorporación de otros co-sustratos agroindustriales, para identificar las condiciones que maximicen la producción de biometano y su potencial energético.

Complementar la cuantificación teórica con evaluaciones experimentales del aprovechamiento energético del biometano, como la estimación de la eficiencia de conversión a energía térmica o eléctrica, para valorar su aplicación a escala piloto o industrial.

Finalmente, se recomienda evaluar la viabilidad técnica y económica del escalamiento del sistema, considerando su aplicación como alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos agroindustriales en el sector productivo.

Bibliografías

APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association. *Water Environment Federation, 45*(13), 2540.

Archila, A. (2016). Evaluación de la co-digestión anaerobia de una mezcla terciaria compuesta por gallinaza de jaula, melaza de caña y lactosuero en un reactor de tanque agitado. *Universidad Industrial de Santander., 24*(9), 236-278.

Bernal, P., y Chadwick, R. (2021). Enfoques actuales y tendencias futuras en los criterios de calidad del compost para obtener beneficios agronómicos, ambientales y para la salud humana. *Avances en Agronomía, 45*(16), 14-96. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.002

Biswal, B. K., y Balasubramanian, R. (2022). Adsorptive removal of sulfonamides, tetracyclines and quinolones from wastewater and water using carbon-based materials: Recent developments and future directions. *Journal of Cleaner Production, 349*, 131421. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131421

Cabezas, C., y Andrade, G. (2025). Transformación sostenible: generación de biogás a partir de estiércol animal mediante biodigestores en la comunidad María Eugenia, Yaguachi. *Revista ESPAMCIENCIA, 16*(1), 20-25. https://doi.org/10.51260/1390597X.513

Chen, R., Liang, H., Wang, J., Lin , D., Zhang, H., Cheng, X., y Tang, X. (2021). Effects of predator movement patterns on the biofouling layer during gravity-driven membrane filtration in treating surface water. *Science of The Total Environment, 771*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145372

Chen, Y., Cheng, J., y Creamer, K. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology, 99*(10), 4044-4064. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057

Cordova, D. (2025). Crecimiento de Quercus durifolia Seemen en sustratos con turba, corteza, aserrín y fertilizante de liberación controlada. *Revista mexicana de ciencias forestales, 16*(88), 78-152. https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i88.1526

Díaz, M., Gómez, M., y Pérez, J. (2015). Tratamiento anaerobio de desechos lácticos y estiércol de cabra. *Revista de Energías Renovables, 12*(3), 45 - 52.

Espín Valladares , R., Núñez Pérez, J., Lara Fiallos, M., Pereda Reyes, I., Pais-Chanfrau, J., y Huaita, A. (2023). Modelisation of the Biomethane Accumulation in Anaerobic Co-Digestion of Whey and Sugarcane Molasse Mixtures. *9*(9), 834. https://doi.org/10.3390/fermentation9090834

Espinosa, G. (2021). *Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable. Análisis del potencial de la ciudad de Quito.* Tesis. https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8410/1/T3670-MCCSD-Espinosa-Biogas.pdf

Espinoza, A. (2024). Generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos (rsu) mediante el uso de tecnologías waste-to-energy (wte), panorama global y perspectivas en Panamá. *Revised document received:, 6*(4), 45-96. https://doi.org/10.18601/01245996.v27n52.15

Espitia, G. (2022). *Desarrollo de una propuesta de digestion anaerobia en dos fases para la obtencion de biogas mediante residuos citricos.* Tesis, Fundacion Universidad de America. https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/c8b00986-02f6-4d95-bed8-c9a3a91aca33/content

European Union. (2019). Deliverable D5.4: Simplified life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of food waste valorisation. REFRESH Project. https://eu-refresh.org/sites/default/files/D5.4%20Simplified%20LCA%20and%20LCCof%20food waste%20valorisation_with%20ISBN.pdf

Filer, J., Huihuang , H., y Chang, S. (2019). Método de análisis del potencial bioquímico de metano (BMP) para la investigación de la digestión anaeróbica. *11*(5). https://doi.org/10.3390/w11050921

Flores, R. (2025). Emisiones de metano de residuos sólidos y crecimiento económico en 30 países latinoamericanos y del Caribe. *Paradigma económico, 17*(1), 105-133. https://doi.org/10.36677/paradigmaeconomico.v17i1.23014

García, V. (2015). Manual de Biogás: Conceptos básicos, beneficios de su producción y la aplicación de sus subproductos Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático, Provincia de Buenos Aires. *1*(2), 85-96.

Gavilanes, I. (2024). Efectos de la adición de lactosuero en el compostaje de residuos agropecuarios y en la higienización y calidad del compost obtenido. *Jornadas de la Red Española de Compostaje, 4*(2), 56-87. https://www.researchgate.net/publication/388928388_Efectos_de_la_adicion_de_lactosuero_en_el_compostaje_de_residuos_agropecuarios_y_en_la_higienizacion_y_calidad_del_compost_obtenido

GenCat. (9 de Septiembre de 2009). *Agencia de Residuos de Catalunya*. https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/digestio_anaerobia/

Granda, G. (2025). Influencia de factores estructurales en la atención educativas de estudiantes con necesidades educativas específicas . *Revista Biodanza & Humanismo, 3*(2), 21-34.

Gupta, S., Mandal, B., y Das, R. (2020). Co-digestion of agro-industrial waste for biomethane potential. *A review. Bioresource Technology Reports, 11*. https://doi.org/100537

He , G., Luan, Z., Jin, R., Zhang, W., Wang, W., Zhang, Z., . . . Liu , P. (2022). Numerical and experimental study on absorber-type wave energy converters concentrically arranged on an octagonal platform. *Renewable Energy, 188*, 504-523. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.045

INEN. (2013). *NTE INEN 2153:2013. Aguas residuales. Determinación de sólidos totales, fijos y volátiles en aguas y lodo.* Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Jiang, Y., McAdam, E., Zhang, Y., Heaven, S., Banks, C., y Longhurst, P. (2019). Ammonia inhibition and toxicity in anaerobic digestion: A critical review. *Journal of water Process Engineering, 32*(100899). https://doi.org/10.2016/j.jwpe.2019.1000899

Khan, M., Ahring, B., y Angelidaki, I. (2021). Assessment of theoretical methane potential from different co-digestion combinations of livestock and food industry waste. *Waste Managemen, 120*, 353– 362.

Liebetrau, J., Ammenberg, J., Gustafsson, M., Pelkmans, L., y Murphy, J. D. (2022). *The role of biogas and biomethane in pathway to net zero.*

Lizárraga, M., y Mendoza, M. (2023). El inocente impacto ambiental del suero de la leche. *Epistemus (Sonora), 18*(35), 88-97. https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i35.316

López, K., y Escobar, D. (2022). Producción de biogás a partir de la co-digestión de melaza y estiércol de vaca. *Actas de Investigación de la Universidad Científica y Tecnológica, 2*(1), 80–88. https://revistas.unicyt.org/index.php/actasidi-unicyt/article/view/126

López, M., Arnaiz, S., y Garcia, M. (2021). Biomethane as an energy vector for circular economy. *Challenges and opportunities. Energies, 14*(9), 2586.

Lozano, L., Pineda, D., y Soto, D. (2021). Anaerobic digestion modeling for energy planning in rural areas. *Energy Reports, 7*, 7681– 7689.

Madigan, M. (2010). *FBK*. https://fbkmexico.com/clasificacion-de-los-microorganismos/

Mainardis, M., Flaibani, S., Matteo Trigatti , M., y Goi, D. (2019). Techno-economic feasibility of anaerobic digestion of cheese whey in small Italian dairies and effect of ultrasound pre-treatment on methane yield. *Journal of Environmental Management, 246*, 557-563. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.014

Maldonado, E. (2025). Aprovechamiento energético sostenible evaluado mediante un enfoque multicriterio a partir de biogás producido con tierra filtrante. *Revista Minerva, 1*(18), 25-63. https://doi.org/10.47460/minerva.v6i18.219

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., y Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45*, 540-555. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032

Méndez, C., y Rivas, A. (2021). Innovative biogas projects for circular agroindustry in Latin America. *Journal of Cleaner Production, 14*(6), 294. https://doi.org/126290

Montenegro, G., y Rojas, M. (2019). Efecto de la temperatura y el tiempo de retención hidráulica en la producción de biogás en una planta piloto de digestión anaerobia. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 1*(1), 45-96.

Montoya, M. (2021). aracterización química y física de sustratos enriquecidos con minerales y composta. *Terra Latinoamericana, 39*, 25-78. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.601

Mora, C., Quevedo, J., Zhiminaicela, J., Herrera, S., Morocho, A., y León, J. (30 de Abril de 2021). https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/article/view/2706/3797

Morocho, C. (2023). Biogas: A Sustainable Energy Source for a Greener Future. *Energy efficiency and sustainability , 2*(2), 45-96. https://doi.org/10.53591/easi.v2i2.2563

Muñoz, B. (2020). El proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos. Métodos y resultados. *Polo del Conocimiento, 41*(14), 89-125. http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es

Nasir, I., Mohd, T., y Omar, R. (2012). Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production. *A review. Engineering in Life Sciences, 12*(3), 258–269. https://doi.org/10.1002/elsc.201100150

Negro, V., Noussan, M., y Chiaramonti, D. (2025). Alternative options for biogas-to-energy: A comparison of electricity and biomethane generation based on the real operation of a production site. *Applied Energy, 377*(1). https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124687

Párraga, R., y Chávez, K. (2020). Evaluación fisicoquímica del lactosuero obtenido del queso fresco pasteurizado producido en el taller de procesos lácteos en la espam "Mfl". *Revista Científica de Ciencia y Tecnología El Higo, 10*(1), 36-75. https://doi.org/10.5377/elhigo.v10i1.9921

Ramírez, M., C. J., y Quintero, J. (20219). Theoretical modeling of methane potential for small-scale rural digesters. *Renewable Energy, 133*, 612– 620.

REPSOL. (2024). *REPSOL Global*. https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biometano/index.cshtml

Reyes, J., y Barrenechea, S. (2022). Estimación del potencial energético técnico a partir de biomasa residual agroindustrial y pecuario en el Perú. *Revista de Innovación y Tecnología, 3*(1), 80–90.

Reyes, M., y Cevallos, S. (2023). Obtención de biofertilizantes enriquecidos en biodigestores semicontinuos a nivel laboratorio. *ResearchGate, 6*(2), 46-96. https://www.researchgate.net/publication/368686258_Obtencion_de_biofertilizantes_enriquecidos_en_biodigestores_semicontinuos_a_nivel_laboratorio

Rocha, M., Carvalho, T., Oliveira, G., Teixeira, L., Marques, M., y Mangiavacchi, N. (2024). Analysis of biogas production from sewage sludge combining BMP experimental assays and the ADM1 model. *PeerJ*. https://doi.org/10.7717/peerj.16720

Rojas, J., y Salazar, R. (2021). Digestión anaerobia de estiércol de ovino para producir biogás y bioabonos. *Revista Agroproductividad, 14*(6), 127–132. https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1201

Shusen, W., Chun, Z., Chun, L., Haiping, Y., Mei, M., Huixiang, J., y Sizhe, C. (2020). Effects of hemicellulose, cellulose and lignin on the ignition behaviors of biomass in a drop tube furnace. *Bioresource Technology, 310*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123456

Silva, T., Lopes, W., y Oliveira, R. (2020). Synergistic effects in co-digestion of agro-industrial residues for biogas production. *Environmental Technology, 41*(13), 1670-1681.

Song, L., Li, D., Fang, H., Cao, X., Liu, R., Niu, Q., y Li, Y.-Y. (2019). Revealing the correlation of biomethane generation, DOM fluorescence, and microbial community in the mesophilic co-digestion of chicken manure and sheep manure at different mixture ratio. *nviron Sci Pollut Res, 26*, 19411-19424. https://doi.org/doi.org/10.1007/s11356-019-05175-1

Torres, J., y González, C. A. (2022). Environmental benefits of codigestion in rural agroindustrial contexts. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(18), 26715–26727.

Torres, P., y Cárdenas, M. (2020). Influencia del ph sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient, 17*(2), 553-562. http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n2v17n2a27.pdf

Torres, Q. (2021). Alternativas tecnológicas para uso del lactosuero: valorización económica de residuos. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional, 30*(55), 250-351. https://doi.org/10.24836/es.v30i55.908

Vásquez, J. (2023). Eficiencia energética del Biogas CH4 producido con desechos de cosechas cacaoteras en el cantón la Maná como una alternativa de energía renovable. *Revista Universidad y Sociedad, 15*(5), 150-236. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202023000500304

Vásquez, P. (2023). Eficiencia energética del biogás CH_4 producido con desechos de cosechas cacaoteras en el cantón La Maná como una alternativa de energía renovable. *Universidad y Sociedad, 15*(5), 304 – 314.

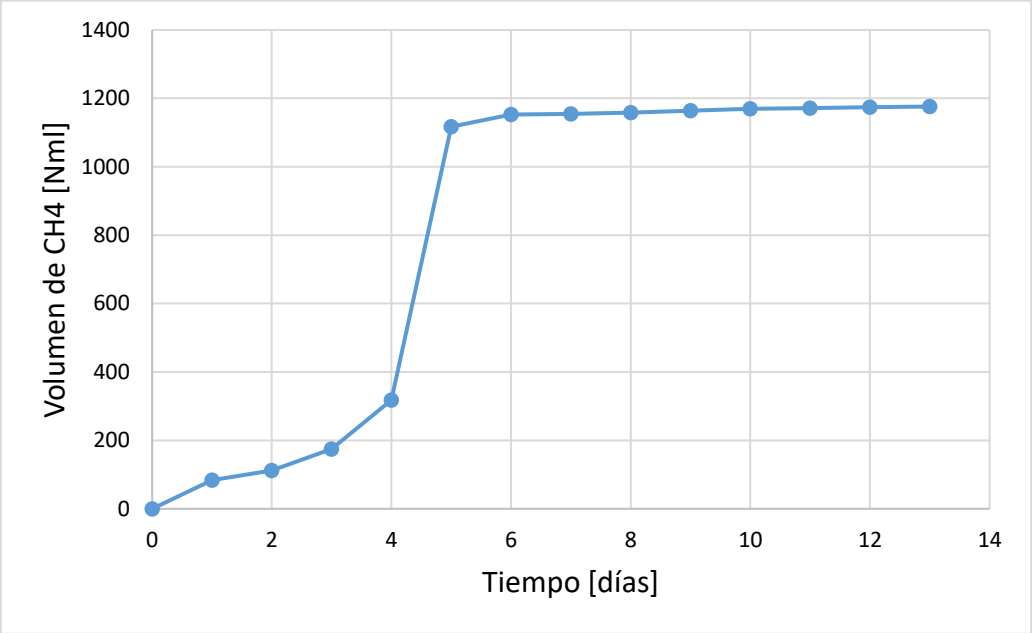
Villegas, L., y Caiza, C. (2024). Evaluación técnica y económica de la transformación de biogás en energía eléctrica. *Revista Científica INGENIAR, 7*(5), 445 682. https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/231

Wang, X., Cai, C., Zhou, T., Yang, Y., Chen, Y., Wang, T., . . . Li, Q. (2023). A new similarity criterion and design method for wind tunnel model tests of floating offshore wind turbines. *Energy Conversion and Management, 277*(116560). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116560

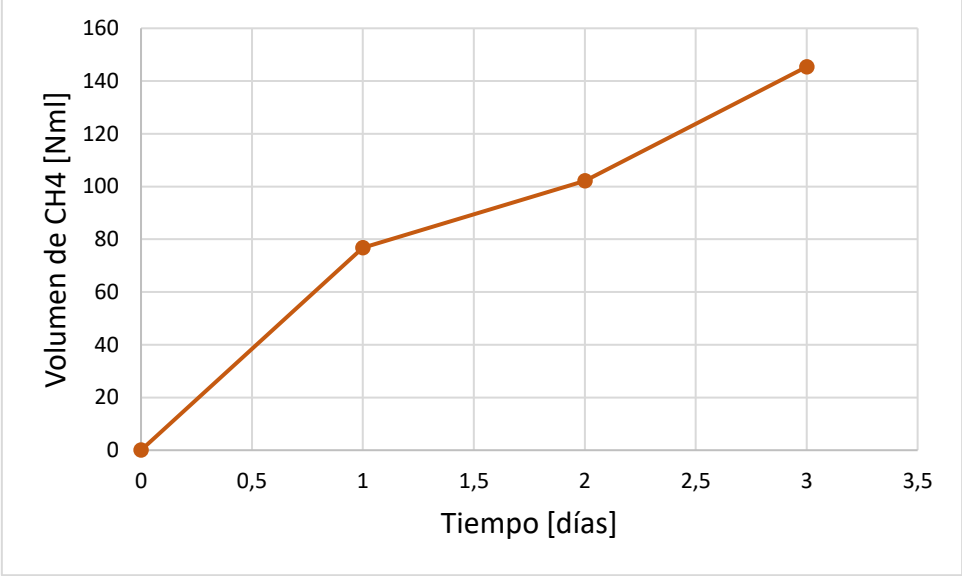
Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., y Tan, T. (2023). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, 170-176. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.138

ANEXOS

Anexo 1. *Volumen de la muestra 1 en días*



Anexo 2. *Volumen de la muestra 2 en días*



Anexo 3. *Volumen de la muestra 3 en días*



Anexo 4. *Volumen de la muestra 4 en días*



Anexo 5. *Volumen de la muestra 5 en días*



Anexo 6. Sistema automático de prueba de producción de biometano

