

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE  
LACTOSUERO UTILIZANDO COMO INÓCULOS MICROORGANISMOS  
RUMINALES Y LODOS DE LA PTAR DE SAN JERÓNIMO**

**PRESENTADO POR:**

Br. LISET DELIA SULLCARANI DIAZ

Br. DAYCELY MIRIAM HUANCA QUISPE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**ASESORA:**

Dra. AMANDA ROSA MALDONADO FARFAN

**CUSCO – PERÚ**

**2025**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor ..... Dra. Ing. Amanda Rosa Maldonado Farfán.....  
..... quien aplica el software de detección de similitud al  
trabajo de investigación/tesis titulada: Evaluación de la producción de biogás a.....  
..... partir de lactosuero utilizando como inoculos microrganismos ruminantes  
y lodos de la PTAR de San Serónimo.....

Presentado por: Liset Delfa Sullcaraní Díaz ..... DNI N° 70401776 ;  
presentado por: Daycely Miniam Huanca Quispe ..... DNI N°: 70585388  
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Químico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6º del Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4%.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 18 de diciembre de 2025

Firma

Post firma: Dra. Ing. Amanda Rosa Maldonado Farfán

Nro. de DNI: 23822559

ORCID del Asesor: 0000 - 0002 - 4870 - 7078

### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259-541764241

# EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LACTOSUERO UTILIZANDO COMO INÓCULOS MICROORGANISMOS

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:541764241

81 páginas

Fecha de entrega

17 dic 2025, 10:05 p.m. GMT-5

19.857 palabras

Fecha de descarga

17 dic 2025, 10:07 p.m. GMT-5

105.227 caracteres

Nombre del archivo

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LACTOSUERO UTILIZANDO COMO INÓ....pdf

Tamaño del archivo

2.2 MB

## 4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

### Fuentes principales

4%	 Fuentes de Internet
0%	 Publicaciones
1%	 Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **PRESENTACIÓN**

Sr. Decano y distinguidos docentes de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

De conformidad con lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de Procesos, ponemos a vuestra consideración la tesis titulada: “Evaluación de la producción de biogás a partir de lactosuero utilizando como inóculos microorganismos ruminales y lodos de la PTAR de San Jerónimo”, con la finalidad de optar al Título Profesional de Ingeniero Químico.

La presente investigación tiene como propósito evaluar la producción de biogás a partir de lactosuero, empleando como inóculos microorganismos ruminales y lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Jerónimo.

Confiamos en que este trabajo de investigación pueda constituirse en un aporte académico y servir como referencia para futuros estudios en el ámbito de la producción de energías renovables y el aprovechamiento de residuos orgánicos.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo primero a Dios, porque el ha sido siempre mi fortaleza en aquellos momentos de desesperación, él es el único que sabe todo el camino que pasamos para lograr esta meta.

A mis padres, quienes con su amor, trabajo y ejemplo me enseñaron el valor del esfuerzo, la educación y la perseverancia.

A mis hermanos, quienes con tan solo su presencia me hicieron sentir cálida y no me dejaron sola.

A mi familia y mis amigos, por su apoyo y aliento en los momentos más difíciles.

**Daycely Miriam**

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Delia y Eloy, quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional han sido la base para alcanzar esta meta. A mis hermanos, Boris y Kevin, por ser fuente de compañía y motivación constante.

A mis tíos Ubaldina y Ana, por su preocupación y respaldo en cada etapa de este proceso.

Finalmente, a Guido, quien con su aliento constante me motivó a avanzar incluso en los momentos difíciles, y a su madre, María, por las oraciones y buenos deseos que siempre me acompañaron.

Este logro es tan mío como de ustedes, porque sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible.

**Liset Sulcarani**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios, fuente de vida y sabiduría, por habernos otorgado la fortaleza, la paciencia y la perseverancia necesarias para culminar con éxito este trabajo de investigación. Extendemos nuestro más sincero reconocimiento a nuestra alma máter, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, en especial a nuestra Escuela Profesional de Ingeniería Química, por brindarnos una sólida formación académica y científica, así como los valores éticos y profesionales que guiarán nuestro desempeño en la sociedad.

De manera muy especial, expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestra asesora de tesis, la Dra. Amanda Maldonado Farfán, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso constante. Su experiencia y dedicación han sido fundamentales para la estructuración y culminación de esta investigación.

Asimismo, manifestamos nuestra gratitud a la Química María Ofelia Guillén Zevallos, por brindarnos generosamente el acceso a su laboratorio en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

No podemos dejar de reconocer a nuestra amiga Brenda Paguada, su familia y al Ingeniero César Paniagua Chacón, por su colaboración en la recolección de muestras y por las facilidades que nos brindaron en el proceso, mostrando siempre disposición y compromiso. Finalmente, queremos agradecer a nuestras familias y amigos, quienes fueron nuestro principal soporte emocional durante esta etapa. Cada palabra de ánimo, cada gesto de apoyo y cada muestra de cariño han sido esenciales para que hoy podamos concluir con satisfacción esta importante meta académica.

A todos ellos, nuestro más profundo y sincero agradecimiento.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN .....	ii
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABLAS .....	9
RESUMEN .....	10
ABSTRACT .....	11
CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.1.2.1. PROBLEMA GENERAL .....	4
1.1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS .....	4
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTACIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
1.3. OBJETIVOS .....	5
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	5
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. ANTECEDENTES .....	7
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES .....	7
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES .....	8
2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	10
2.2.1. INDUSTRIA QUESERA Y SUBPRODUCTOS .....	10
2.2.1.1. LACTOSUERO .....	11
2.2.1.2. PROBLEMAS AMBIENTALES DEL LACTOSUERO .....	11
2.2.1.3. FORMAS DE APROVECHAMIENTO DEL LACTOSUERO .....	12
2.2.2. LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	12

2.2.3.	MICROORGANISMOS DEL RUMEN.....	12
2.2.4.	DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	13
2.2.4.1.	RELACIÓN INÓCULO-SUSTRATO (RIS) EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA .....	13
2.2.4.2.	INFLUENCIA EN EL PROCESO .....	13
2.2.4.3.	ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA .....	14
2.2.5.	BIOGÁS .....	16
2.2.5.1.	APLICACIONES ENERGÉTICAS DEL BIOGÁS.....	17
2.2.5.2.	MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL BIOGÁS .....	17
2.2.5.3.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE METANO .....	20
2.3.	MARCO CONCEPTUAL .....	22
2.4.	HIPÓTESIS .....	23
	CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
3.1.	MUESTRA .....	25
3.2.	MATERIALES, EQUIPOS E INSTRUMENTOS .....	25
3.3.	MÉTODOS .....	27
3.3.1.	RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA.....	27
3.3.2.	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO (C/N) DE LA MUESTRA DE LACTOSUERO .....	30
3.3.3.	CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES .....	31
3.3.4.	OBTENCIÓN DE BIOGÁS .....	33
3.3.4.1.	Identificación de variables .....	33
3.3.4.2.	Diseño de la investigación .....	34
3.3.4.3.	Cálculo de la cantidad de sustrato.....	35
3.3.4.4.	Cálculo del volumen de biogás.....	37
3.3.4.5.	Cálculo del volumen de metano .....	38
3.3.4.5.1.	Determinación de la cinética de producción de metano .....	40
3.3.4.6.	Ánálisis estadístico .....	41
3.3.4.7.	Determinación de la producción teórica de metano.....	41
3.3.5.	DETERMINACIÓN DE PARAMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS.	42

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	43
4.1.    RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO (C/N) DEL LACTOSUERO .....	44
4.2.    CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES .....	44
4.3.    OBTENCIÓN DE CANTIDAD BIOGÁS .....	45
4.3.1.    CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE SUSTRATO .....	45
4.3.2.    VOLUMEN DE BIOGAS .....	46
4.3.2.1.    ANÁLISIS ESTADISTICO .....	49
4.4.    OBTENCIÓN DE CANTIDAD DE METANO (CALIDAD BIOGÁS) .....	53
4.4.1.    VOLUMEN DE METANO .....	53
4.4.1.1.    ANÁLISIS CINÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE METANO.....	56
4.4.1.2.    ANÁLISIS ESTADISTICO .....	59
4.4.1.3.    DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN TEÓRICA DE METANO.....	62
4.5.    PARÁMETROS DEL PROCESO.....	64
4.5.1.    PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	64
4.5.2.    PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO .....	64
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES .....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
APENDICES .....	75
ANEXO .....	77

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Etapas de la digestión anaeróbica	16
<b>Figura 2</b> Método manométrico	18
<b>Figura 3</b> Método volumétrico por desplazamiento	18
<b>Figura 4</b> Método volumétrico de medición de biogás por jeringa	19
<b>Figura 5</b> Medición de biogás por conexión a un caudalímetro	20
<b>Figura 6</b> Ubicación de la quesería Sumaqcha	27
<b>Figura 7</b> Recolección del lactosuero	27
<b>Figura 8</b> Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)	28
<b>Figura 9</b> Recolección de los lodos digeridos	28
<b>Figura 10</b> Ubicación del camal de San Jerónimo	29
<b>Figura 11</b> Recolección de los microorganismos ruminales	29
<b>Figura 12</b> Conservación de las muestras recolectadas	30
<b>Figura 13</b> Diagrama de flujo para la caracterización de los sólidos volátiles	32
<b>Figura 14</b> Procedimiento del método 2540 E (Sólidos fijos y volátiles incinerados)	32
<b>Figura 15</b> Detalle de los nueve experimentos	35
<b>Figura 16</b> Pasos para el proceso de obtención de biogás y medición de su volumen	36
<b>Figura 17</b> Medición del volumen de biogás	36
<b>Figura 18</b> Producción de biogás en función al tiempo	46
<b>Figura 19</b> Diagrama de Pareto de la producción de biogás	50
<b>Figura 20</b> Producción de metano en función al tiempo	53
<b>Figura 21</b> Cinética de producción de metano del modelo de Gompertz	57
<b>Figura 22</b> Comparación cinética de producción de metano del modelo de Gompertz	58
<b>Figura 23</b> Diagrama de Pareto de la producción de metano	59

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Composición química del lactosuero .....	11
<b>Tabla 2</b> Reacciones en la digestión anaeróbica .....	15
<b>Tabla 3</b> Lista de materiales, equipos e instrumentos .....	26
<b>Tabla 4</b> Plan experimental.....	34
<b>Tabla 5</b> Resultado del análisis de C% y N% del lactosuero .....	44
<b>Tabla 6</b> ST, SF y SV de las muestras .....	44
<b>Tabla 7</b> Cantidad de sustrato para cada valor de RIS Y tipo de inóculo.....	45
<b>Tabla 8</b> Volumen de biogás .....	48
<b>Tabla 9</b> Análisis de varianza de la producción de biogás.....	50
<b>Tabla 10</b> Prueba de Tukey para la relación con RIS con una confianza de 95%.....	51
<b>Tabla 11</b> Prueba de Tukey para la relación con el tipo de inóculo con una confianza de 95%.....	51
<b>Tabla 12</b> Prueba de Tukey para la relación con el RIS y el tipo de inóculo con una confianza de 95%.....	52
<b>Tabla 13</b> Volumen de metano .....	54
<b>Tabla 14</b> Parámetros cinéticos del modelo de Gompertz.....	56
<b>Tabla 15</b> Análisis de varianza de la producción de metano.....	60
<b>Tabla 16</b> Prueba de Tukey para la relación de RIS con una confianza de 95%.....	61
<b>Tabla 17</b> Prueba de Tukey para la relación tipo de inóculo con una confianza de 95% .....	61
<b>Tabla 18</b> Prueba de Tukey para la relación con el RIS y el tipo de inóculo con una confianza de 95%.....	62
<b>Tabla 19</b> Comparación entre metano teórico y experimental.....	63

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la producción de biogás a partir de lactosuero ácido, utilizando como inóculos microorganismos ruminantes y lodos de la PTAR de San Jerónimo. Estos materiales contienen comunidades microbianas anaerobias con un importante potencial para la generación de energía renovable.

La investigación se desarrolló mediante un diseño factorial que consideró como variables independientes el tipo de inóculo y la relación inóculo-sustrato, manteniendo una temperatura constante de 37 °C durante 16 días. Asimismo, se realizó la caracterización del lactosuero y de los inóculos mediante la relación carbono/nitrógeno y el contenido de sólidos volátiles, parámetros fundamentales para evaluar la biodegradabilidad del sustrato y el desempeño del proceso anaerobio.

Los resultados mostraron que la combinación rumen y lodos a una RIS de 1.0 alcanzó la mayor producción total de biogás, cercana a 200 ml. No obstante, el mayor rendimiento específico de metano se obtuvo con el tratamiento que empleó únicamente rumen a RIS 1.0, con un valor de 77.55 ml CH<sub>4</sub>/gSV. Este comportamiento se explica por la elevada diversidad y capacidad hidrolítica de los microorganismos ruminantes, que favorecen una degradación más eficiente del lactosuero y una mayor conversión a metano.

En conclusión, el uso del lactosuero como sustrato, junto con la adecuada selección del inóculo y la RIS, permite obtener biogás de mayor valor energético y representa una alternativa sostenible para el manejo de residuos agroindustriales y el impulso de la economía circular en comunidades queseras.

**Palabras clave:** Lactosuero, Biogás, Digestión anaeróbica, Microorganismos ruminantes, Lodos de PTAR.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate biogas production from acid whey, using rumen microorganisms and sludge from the San Jerónimo Wastewater Treatment Plant (WWTP) as inoculants. These materials, commonly considered polluting waste, contain anaerobic microbial communities with significant potential for renewable energy generation.

The research was conducted using a factorial design that considered the type of inoculum and the inoculum-substrate ratio as independent variables, maintaining a constant temperature of 37 °C for 16 days. The whey and inoculants were also characterized by determining the carbon-to-nitrogen ratio and volatile solids content, key parameters for evaluating substrate biodegradability and the performance of the anaerobic process.

The results showed that the combination of rumen and sludge at an inoculum-to-substrate ratio (RIS) of 1.0 achieved the highest total biogas production, close to 200 ml. However, the highest specific methane yield was obtained with the treatment using only rumen at RIS 1.0, with a value of 77.55 ml CH<sub>4</sub>/gVS. This performance is explained by the high diversity and hydrolytic capacity of rumen microorganisms, which promote more efficient whey degradation and greater conversion to methane.

In conclusion, the use of whey as a substrate, along with appropriate inoculum selection and RIS, allows for the production of biogas with higher energy value and represents a sustainable alternative for managing agro-industrial waste and promoting the circular economy in cheese-producing communities.

**Keywords:** Whey, Biogas, Anaerobic digestion, Ruminal microorganisms, Wastewater sludge.

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, el aprovechamiento de residuos orgánicos agroindustriales se ha convertido en una alternativa clave para mitigar los impactos ambientales generados por su inadecuada disposición. Uno de estos residuos es el lactosuero, subproducto del procesamiento del queso, el cual presenta una carga contaminante si no se gestiona correctamente. A pesar de su potencial energético, en muchas regiones del país, especialmente en las zonas altoandinas, este subproducto es vertido sin tratamiento previo, afectando suelos y cuerpos de agua.

De forma paralela, residuos como el contenido ruminal bovino y los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) también representan una problemática ambiental, pero al mismo tiempo contienen poblaciones microbianas anaerobias que pueden ser aprovechadas como inóculos para procesos de digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica es un procedimiento que permite transformar residuos orgánicos en biogás, una fuente de energía renovable compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. Este proceso depende en gran medida del tipo y proporción del inóculo utilizado, así como de la relación carbono-nitrógeno y la cantidad de sólidos volátiles del sustrato.

El presente estudio propone utilizar el lactosuero como sustrato principal y evaluar su rendimiento en la producción de biogás al ser combinado con microorganismos ruminantes y lodos de PTAR como inóculos. El objetivo es determinar cuál de estos inóculos, permite maximizar la producción y calidad del biogás, contribuyendo así a la generación de energía limpia, la valorización de residuos y el fortalecimiento de un enfoque de economía circular en comunidades rurales productoras de quesos.

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

La producción de restos orgánicos a gran escala representa uno de los mayores desafíos ambientales en el Perú y el mundo. Sectores como el agropecuario y la industria láctea producen grandes volúmenes de desechos, como el lactosuero, rumen y los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), los cuales, al ser gestionados inadecuadamente, generan contaminación del agua, suelo y aire, además de contribuir al cambio climático por emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ).

El lactosuero es un derivado líquido producido durante la elaboración de queso, caracterizado por su alta carga orgánica. Según Osorio González *et al.*, (2022), presenta la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de hasta 110 000 mg O<sub>2</sub>/l y una demanda química de oxígeno (DQO) en 210 000 mg O<sub>2</sub>/l, lo que lo convierte en un contaminante significativo cuando se descarga sin tratamiento. Torres (2018) señala que aproximadamente el 90% del volumen de leche utilizado en la elaboración de quesos se transforma en lactosuero, del cual una gran proporción se elimina inadecuadamente. Su disposición en cuerpos de agua provoca eutrofización, reducción del oxígeno disuelto y afectación de los ecosistemas acuáticos. Además, cuando se vierte en suelos, puede alterar su estructura y reducir la productividad agrícola debido a su alta acidez y contenido de sales (Marwaha y Kennedy, 2007).

Los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) contienen altas concentraciones de materia orgánica, metales pesados y microorganismos. Noyola *et al.*, (2016) destacan que estos lodos representan una fuente importante de emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ), un gas con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Además, su disposición inadecuada en rellenos sanitarios o su aplicación directa en suelos sin tratamiento previo puede generar riesgos sanitarios y contaminación de acuíferos. En lugares como San Jerónimo - Cusco, donde la infraestructura para el manejo de lodos es limitada, este problema se agrava, generando pasivos ambientales acumulativos.

El rumen (contenido del estómago de rumiantes), generado como residuo en los mataderos, representa un importante problema ambiental si no se maneja de forma adecuada, debido a su alta carga orgánica, potencial de contaminación microbiológica y emisión de gases de efecto invernadero como el metano durante su descomposición anaerobia. Este residuo puede contaminar suelos y cuerpos de agua, favoreciendo procesos de eutrofización y afectando la biodiversidad local (Pérez *et al.*, 2019).

Por tanto, es necesario plantear alternativas para mitigar los impactos que generan los residuos orgánicos mencionados, uno de ellos es otorgarles un valor agregado sometiéndolos a un proceso de digestión anaeróbica que genere biogás.

El objetivo de esta investigación es evaluar la producción de biogás a partir de lactosuero utilizando microorganismos ruminantes y lodos de la PTAR como inóculos.

### **1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.1.2.1. PROBLEMA GENERAL**

- ¿Cuál es la producción de biogás a partir de lactosuero utilizando como inóculos microorganismos ruminantes y lodos de la PTAR de San Jerónimo?

#### **1.1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

- ¿Cuál es la relación de carbono – nitrógeno del lactosuero?
- ¿Cuál es el contenido de sólidos volátiles del sustrato (lactosuero) e inóculos (lodos de la PTAR, microorganismos ruminantes)?
- ¿Cómo influye la relación inóculo-sustrato (RIS) y tipo de inóculo en la cantidad y calidad de biogás?
- ¿Cuáles son los valores de la relación inóculo-sustrato (RIS) y el tipo de inóculo que logran mayor cantidad y calidad de biogás?

## **1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTACIA DE LA INVESTIGACIÓN**

Esta investigación aporta conocimientos sobre la digestión anaeróbica al evaluar el comportamiento de diferentes inóculos (microorganismos ruminantes y lodos de PTAR) en la producción de biogás a partir de lactosuero, estableciendo un precedente científico para futuros estudios sobre el tratamiento de residuos agroindustriales mediante sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala. Los resultados obtenidos podrían aplicarse como base en el diseño de biodigestores adaptados a las condiciones de zonas altoandinas, donde la gestión de residuos orgánicos es un desafío crítico.

A nivel ambiental el estudio ofrece una solución sostenible al reducir la carga orgánica de este desecho lácteo y minimizar emisiones de metano, mitigando así su impacto en suelos y fuentes hídricas. Además, al aprovechar lodos de plantas de tratamiento y residuos ruminantes, se promueve un enfoque de economía circular, transformando pasivos ambientales en recursos energéticos. Este enfoque se encuentra en concordancia con la normativa nacional vigente. El Decreto Legislativo N.º 1278 (Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos), en su artículo 6, establece que la valorización debe priorizarse frente a

otras formas de gestión, incentivando tanto el aprovechamiento energético como la transformación de residuos en recursos.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la producción de biogás a partir de lactosuero utilizando como inóculos microorganismos ruminantes y lodos de la PTAR de San Jerónimo, Cusco.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la relación de carbono – nitrógeno del lactosuero.
- Establecer el contenido de sólidos volátiles del sustrato (lactosuero) e inóculos (lodos de la PTAR, microorganismos ruminantes).
- Evaluar la influencia de la relación inóculo-sustrato (RIS) y del tipo de inóculo en la obtención de la cantidad y calidad de biogás.
- Seleccionar los valores de la relación inóculo-sustrato (RIS) y el tipo de inóculo que logran mayor cantidad y calidad de biogás.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

## 2.1. ANTECEDENTES

### 2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

**Abdallah et al., (2022)**, investigaron la codigestión anaeróbica de suero de leche y aguas residuales de mataderos avícolas para mejorar la producción de biogás y optimizar la gestión de residuos. Usando reactores anaeróbicos donde se realizaron experimentos de codigestión, monitoreando los parámetros clave del proceso como la producción de metano, el rendimiento de biogás y la reducción de sólidos volátiles, el estudio analizó las dinámicas microbianas clave y encontró un incremento del 20-30% en la producción de biogás en comparación con la digestión individual de cada residuo. La mezcla de ambos residuos mejoró la consistencia del procedimiento y estimuló el crecimiento de arqueas metanogénicas, favoreciendo la conversión de materia orgánica en metano. Los autores concluyen que esta combinación de residuos industriales ofrece ventajas significativas tanto en la producción energética como en la eficiencia del tratamiento de residuos.

**Zhang et al., (2019)**, evaluaron la producción de biogás a partir de residuos agrícolas (paja de trigo y maíz), compararon tres condiciones: lodos de PTAR solos, microorganismos ruminiales (obtenidos de bovinos) solo y una mezcla 50:50 de ambos inóculos, trabajando bajo condiciones controladas de laboratorio (reactores batch de 1L, 35°C, pH 7.0–7.5, y 30 días de retención). La mezcla rumen-PTAR mostró un rendimiento superior, con una producción acumulada de biogás de 428 ml/g VS (40% mayor que los lodos solos: 306 ml/g VS) y un contenido de metano del 62–65% (265 ml CH<sub>4</sub>/g VS). Además, logró una reducción del 78% en DQO (vs. 55% en el control) y mantuvo bajos niveles de AGV (1,200 mg/L), evitando la acidificación. Los análisis microbianos confirmaron la presencia de Bacteroidetes (hidrólisis) y Methanosaeta (metanogénesis), explicando la mayor eficiencia. La sinergia entre ambos inóculos optimizó las etapas de hidrólisis y metanogénesis, demostrando su potencial para tratar residuos lignocelulósicos. Los autores sugieren validar este enfoque en otros sustratos complejos, como desechos lácteos o agroindustriales, para escalar su aplicación.

**Del Pópolo et al., (2018)** en su artículo tuvieron como objetivo evaluar la generación de biogás a partir de la codigestión de suero dulce (SD) y suero ácido (SA) con estiércol bovino (E), en distintas proporciones, para identificar la mezcla más eficiente y analizar cómo influye el tipo de suero en el proceso. Las proporciones evaluadas fueron 100%E, 75%E:25%SD/SA, 50%E:50%SD/SA y 25%E:75%SD/SA, todas por duplicado. Los ensayos en lote se realizaron en recipientes de vidrio conectados a eudiómetros, sumergidos en un

baño de agua a 35°C. Se usó como inóculo lodo de una planta de tratamiento de residuos de Göttingen, y el pH inicial se ajustó a 8. La producción de biogás se midió diariamente, y las mezclas más productivas se repitieron con agitación. La caracterización química de los sustratos (E, SD y SA) se hizo mediante el sistema fotométrico LCK de HACH, analizando fósforo, sulfatos, nitrógeno, TOC y DQO. La digestión anaerobia duró 27 días con SD, 57 días con SA y 9 días en los ensayos con agitación. Los resultados mostraron que las mezclas con suero ácido (SA) generaron más biogás, y las que tuvieron mejores rendimientos presentaron una alta concentración de metano en la composición del biogás.

**López, (2019)** en su tesis tuvo como objetivo encontrar la relación más efectiva entre estiércol de vaca y lactosuero para producir biogás, utilizando reactores anaerobios en condiciones de laboratorio. Estableció cuatro series de pruebas para la determinación de los potenciales bioquímicos de metano, manteniendo una relación de sustrato/inóculo de 0.5 y ajustando las masas de sustrato e inóculo. Cada potencial bioquímico de metano incluyó cinco mezclas de estiércol y lactosuero (realizadas en duplicado): 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100, junto con un blanco y un control con ácido acético. Los ensayos se llevaron a cabo en botellas de 250 ml con un volumen de trabajo de 40 ml, agitados constantemente, a una temperatura de 37°C, a una presión atmosférica de 0.771 atm y en ausencia de oxígeno. Para el análisis de la composición del biogás, se utilizó un cromatógrafo de gases. De acuerdo con los resultados, concluyeron que el ensayo 25/75 obtuvo la producción más alta de metano. Sin embargo, el propósito es utilizar energéticamente los residuos de una granja, en la que el estiércol es más predominante, por lo que la relación óptima fue 75/25.

### **2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES**

**Mamani et al., (2023)**, el objetivo de su estudio tuvo como finalidad evaluar el potencial de biometanización del lactosuero procedente de cuatro plantas queseras ubicadas en la región de Puno, Perú, específicamente en Ayaviri (PPQA), Lampa (PPQL), Huayrapata (PPQH) y Taraco (PPQT). Para ello, se empleó el ensayo de potencial bioquímico de metano (PBM), complementado con el método de densidad del gas (GD-BMP) para cuantificar la producción de metano. Los resultados indicaron que la planta PPQA alcanzó el mayor rendimiento acumulado de metano, con 371.3 ml CH<sub>4</sub>/g de sustrato volátil añadido, seguida por PPQL con 347.4 ml CH<sub>4</sub>/g, PPQH con 319.5 ml CH<sub>4</sub>/g y finalmente PPQT con solo 4.00 ml CH<sub>4</sub>/g durante un periodo de digestión de 46 días. Además, en la planta PPQT se detectó una concentración elevada de ácidos grasos volátiles (AGV), llegando a 6320 mg CH<sub>3</sub>COOH/L,

mientras que las otras plantas mantuvieron niveles dentro del rango recomendado de 620 a 1276 mg CH<sub>3</sub>COOH/L. Estos resultados confirmaron que el método PBM contribuye a la estabilidad del lactosuero durante la digestión anaerobia, favoreciendo una buena producción metanogénico en las plantas PPQA, PPQL y PPQH; sin embargo, en la planta PPQT se evidenció una inhibición del proceso de digestión anaerobia.

**Zambrano, (2016)**, su estudio tuvo como finalidad medir la producción de biogás a partir de distintas proporciones de estiércol de vaca y suero de queso, utilizando biodigestores anaeróbicos de carga fija a una temperatura constante de 26°C ( $\pm 1$ ) y con pH ajustado mediante hidróxido de calcio. Para optimizar los procesos de biodigestión, las mezclas fueron estabilizadas en dos etapas: una fase aeróbica inicial, seguida de una fase anaeróbica. Las pruebas evaluaron combinaciones de estiércol bovino y suero de queso en una proporción 1:7, logrando un volumen de biogás aproximadamente ocho veces mayor que el de la mezcla inicial durante la primera semana, con un contenido de metano del 27.67%. No se registró producción adicional de biogás después de 60 días de biodigestión. Para determinar la estabilización del biol en la mezcla de estiércol y suero en la proporción 1:7, se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos, microbiológicos y de toxicidad a los 10 y 60 días del proceso. Además, se concluyó que el amonio afecta el pH y el crecimiento de la carga microbiana durante las ocho semanas de biodigestión.

**Curilla et al., (2022)** su tesis tuvo como objetivo analizar el efecto del lactosuero en la producción de biogás, bioabono y biol, mediante el uso de un biodigestor tipo Batch. Se elaboró un diseño de experimento de 4 tratamientos y 3 repeticiones, empleando dosis de 0, 100, 150 y 200 ml de lactosuero, estas dosis fueron adicionadas a 3 litros de agua y 3 kilogramos de estiércol, manteniendo la relación 1:1 en los biodigestores tipo Batch con una capacidad de 8 litros colocados en un invernadero. La mayor producción de biogás se registró en el cuarto tratamiento con valor promedio de 30.67 ml, lo que respalda la influencia favorable de la mayor dosis de suero de leche de 200 ml dado por un período de retención de 21 días. La medición del biogás se realizó mediante el método de desplazamiento de agua que se implementa cuando una probeta se introduce en un recipiente con agua donde la manguera de gas se fija en la parte superior de la probeta. El estudio del bioabono mostró pH de 7.0, una conductividad eléctrica (CE) de 5.762  $dS/m$ , 71.674 % de materia orgánica, y contenidos de nutrientes como 2.32 % de N, 1.918 % de  $P_2O_5$ , 0.760 % de  $K_2O$ , 5.203 % de CaO, 1.078 %

de MgO y 0.138 % de Na, sin variaciones importantes entre procedimientos. El mayor contenido de nitrógeno se observó en el procedimiento de 150 ml, el fosfato ( $P_2O_5$ ) fue más alto con 200 ml, y la mayor humedad se registró con 100 ml de lactosuero.

**Barrena et al., (2017)**, el objetivo de estudio fue mejorar la producción experimental de biogás utilizando una mezcla de estiércol bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*). Se aplicó un diseño estadístico Box-Behnken con tres factores: la proporción estiércol-agua (1:5, 1:4, 1:3), el porcentaje de lactosuero (% v/v: 2, 4, 6) y la cantidad de chips de totora (% p/v: 3, 6, 9). Durante un periodo de 27 días, se llevaron a cabo tres series simultáneas, cada una con 15 experimentos. Los biodigestores tenían una capacidad total de 12 L y un volumen útil de 10 L; el biogás generado se midió mediante el método de desplazamiento de agua, usando botellas calibradas de 1.5 L con marcas cada 100 ml.

El mayor volumen de biogás registrado fue de 1400 ml, logrado con 1.7 y 2.5 L de estiércol (correspondientes a proporciones de 1:3 y 1:5 estiércol-agua) y con 400 y 200 ml de lactosuero (2% y 4% v/v), respectivamente. Se determinó que disminuir la cantidad de estiércol mientras se incrementa el lactosuero permite mantener estable la producción de biogás, y que la totora no influye significativamente en los resultados. El modelo estadístico generado con Statgraphics mostró un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.9470, estimando un volumen máximo de biogás de 1745.74 ml, ligeramente superior al valor experimental obtenido con 1.7 L de estiércol, 282.942 ml de lactosuero y 186.829 g de chips de totora.

## 2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.2.1. INDUSTRIA QUESERA Y SUBPRODUCTOS

La industria quesera genera importantes subproductos, principalmente lactosuero, suero de leche y leche desnatada, que contienen valiosos nutrientes como caseína, lactosa y membrana globular de grasa láctea (Boylston, 2019). Por cada kilogramo de queso producido, se generan aproximadamente 9 kg de suero (Dinkci, 2021). Estos subproductos pueden transformarse posteriormente en ingredientes de valor añadido, mejorando la sostenibilidad y la eficiencia económica de la industria (Boylston, 2019). El suero, en particular, tiene numerosas aplicaciones en la industria alimentaria, mejorando la textura, el sabor y la funcionalidad en diversos productos (Agualongo *et al.*, 2022).

### **2.2.1.1. LACTOSUERO**

El lactosuero es el subproducto líquido que queda tras la eliminación de la caseína de la leche durante la producción de queso (Nagar *et al.*, 2013). Puede clasificarse como suero dulce ( $\text{pH} \geq 5,6$ ) o ácido ( $\text{pH} \leq 5,1$ ), dependiendo del método de producción (Nagar y Nagal, 2013). La composición del lactosuero varía, pero normalmente contiene alrededor del 50% de los sólidos totales de la leche, incluyendo lactosa, proteínas, minerales y vitaminas (Nagar y Nagal, 2013). Dentro de la Tabla 1 se muestra la composición química del lactosuero.

**Tabla 1**

*Composición química del lactosuero*

Agua	93-94%
Sólidos totales (lactosa, proteína/péptidos, minerales, vitaminas, grasa, entre otros)	6-7%
Lactosa	4.5%
Proteína soluble	0.8%
Lípidos	0.5%
Vitaminas del complejo B, tiamina (B1), riboflavina (B2), ácido nicotínico (B3), piridoxina (B6), Biotina (B8), ácido fólico (B9)	
Minerales: sodio, potasio, calcio, magnesio, fosforo y en bajas cantidades zinc.	

*Fuente:* (Peralta, 2018)

### **2.2.1.2. PROBLEMAS AMBIENTALES DEL LACTOSUERO**

El lactosuero, un subproducto de la producción de queso, plantea importantes retos medioambientales a causa de su elevado contenido en materia orgánica (Amaral y Silva, 2021). Cuando se elimina de forma inadecuada, causa una serie dificultad ambiental, puesto a que influye física y químicamente la estructura del suelo, lo que ocasiona un descenso en la utilidad de cultivos agrícolas y cuando se desecha en el agua, disminuye la vida acuática al agotar el oxígeno disuelto (Guerra *et al.*, 2013). Sin embargo, la investigación reciente se ha centrado en la utilización sostenible del lactosuero para mitigar estos problemas medioambientales y, al mismo tiempo, crear valor económico.

### **2.2.1.3. FORMAS DE APROVECHAMIENTO DEL LACTOSUERO**

El lactosuero, un subproducto de la industria láctea, ha sido objeto de numerosas investigaciones debido a su potencial de utilización sostenible y a las preocupaciones medioambientales (Zandona *et al.*, 2021). Tradicionalmente, el lactosuero se ha secado para convertirlo en polvo, pero estudios recientes han explorado opciones más valiosas en relación con lo económico (Lisak *et al.*, 2014). Entre ellas se encuentran la fermentación, la producción de refrescos y la creación de concentrados y aislados de proteína de suero (Lisak y Tratnik, 2014). En la actualidad, la gestión sostenible del lactosuero hace hincapié en las aplicaciones biotecnológicas y alimentarias, produciendo productos de valor añadido como alimentos funcionales, películas comestibles, ácido láctico, bioplásticos y biocombustibles (Zandona *et al.*, 2021). Entre ellos se encuentra la digestión anaerobia del suero de queso para la producción de biogás la cual ha mostrado resultados prometedores en varios estudios. La codigestión con otros sustratos, como purines de ganado o lodos de depuradora, puede mejorar el rendimiento de biogás y la estabilidad del proceso (Comino *et al.*, 2012).

### **2.2.2. LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

La digestión anaerobia de lodos de PTAR es un método eficaz para la producción de biogás y la gestión de residuos. Los estudios han demostrado que el uso de lodos de PTAR como inóculo puede aumentar significativamente la producción de metano a partir de biorresiduos municipales. La relación sustrato-inóculo y la capacidad de amortiguación son factores cruciales que afectan a la producción de biogás (Parra *et al.*, 2016). La digestión anaerobia de lodos de PTAR por sí sola puede alcanzar altas tasas de reducción de DQO y producir cantidades sustanciales de biogás (Nawel *et al.*, 2018). La codigestión con otros residuos orgánicos, como efluentes de molinos de aceite de palma, puede mejorar aún más la producción de metano. La elección del inóculo, el control del pH y la relación inóculo-sustrato son parámetros críticos para optimizar el proceso (Nabarlatz *et al.*, 2013).

### **2.2.3. MICROORGANISMOS DEL RUMEN**

El contenido del rumen del ganado vacuno es un inóculo altamente eficaz para la digestión anaerobia de residuos orgánicos complejos, como el lactosuero, debido a su microbiota diversa y especializada. Contiene bacterias celulolíticas (*Fibrobacter*, *Ruminococcus*), protozoos y arqueas metanogénicas (*Methanobrevibacter*), adaptadas para degradar carbohidratos (lactosa) y lípidos en condiciones anaerobias (Pilarska *et al.*, 2017).

Su elevada actividad enzimática, particularmente  $\beta$ -galactosidasas y celulasas, favorece una hidrólisis acelerada, generando ácidos volátiles (acético, propiónico) que son sustratos clave para la metanogénesis (Ávila *et al.*, 2021).

Marañón *et al.*, (2012) demuestran que este inóculo supera a otros en etapas iniciales de degradación, aunque puede requerir ajustes de pH y carga orgánica para evitar inhibición por acidificación.

#### **2.2.4. DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el que los materiales orgánicos se degradan sin oxígeno, produciendo biogás compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono (Gunnerson *et al.*, 2007). Este proceso se produce de forma natural en entornos como los pantanos y se ha diseñado para el tratamiento de residuos desde principios del siglo XX. La DA ofrece múltiples beneficios, incluyendo la reducción de patógenos, la producción de energía y la creación de fertilizantes (Gunnerson y Stuckey, 2007). Esta tecnología ha ganado popularidad para el procedimiento de diversos desechos orgánicos, desde los de origen municipal hasta los agrícolas (Sayara y Sanchez, 2019). Sin embargo, la eficiencia de la DA depende de la composición bioquímica de los residuos, en particular para los materiales lignocelulósicos, que están presentes en la mayoría de los residuos orgánicos (Sayara y Sanchez, 2019).

##### **2.2.4.1. RELACIÓN INÓCULO-SUSTRATO (RIS) EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

La Relación Inóculo-Sustrato (RIS) es un parámetro crítico en los procesos de digestión anaerobia discontinua (por lotes o batch), ya que determina el balance inicial entre la carga orgánica a tratar y la población microbiana disponible para degradarla (Raposo *et al.*, 2006). Esta relación se define como el cociente entre la masa de sólidos volátiles (SV) aportada por el inóculo y la masa de sólidos volátiles aportada por el sustrato. En términos prácticos, representa cuánta "comida" orgánica (sustrato) se le está suministrando a la "población" de microorganismos (inóculo) presente al inicio del proceso.

##### **2.2.4.2. INFLUENCIA EN EL PROCESO**

• **RIS demasiado baja (< 0.5):** Indica una cantidad insuficiente de microorganismos en relación con la carga orgánica. Esto puede conducir a una acidificación rápida del medio, debido a la acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) que los metanógenos no pueden consumir a la misma velocidad a la que se producen. El descenso del pH resultante inhibe la

metanogénesis, principalmente a una baja producción de biogás y a la posible falla del proceso (Appels et al., 2008).

• **RIS demasiado alta (> 2.0):** Significa un exceso de inóculo en relación con el sustrato. Aunque asegura la estabilidad, puede ser ineficiente a nivel de recursos y espacio del reactor, ya que una gran parte del volumen está ocupado por biomasa microbiana que no tiene suficiente alimento (sustrato) para mantener una alta actividad metabólica, diluyendo el rendimiento esperado.

• **RIS Óptima (usualmente entre 0.5 y 2.0):** Un valor equilibrado asegura que haya suficientes microorganismos para consumir eficientemente los productos de la degradación del sustrato, manteniendo un equilibrio entre las etapas acidogénica y metanogénica. Esto promueve una mayor producción y calidad de biogás y la estabilidad del sistema. La RIS óptima varía según la naturaleza del sustrato y del inóculo (Zhang et al., 2019).

#### 2.2.4.3. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaerobia ocurre en ausencia de oxígeno, donde un conjunto de microorganismos actúa de manera secuencial o en paralelo para descomponer la materia orgánica en varias etapas sucesivas. En la práctica ingenieril, para residuos sólidos o lodos, se suelen considerar tres etapas principales: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. En cambio, para residuos líquidos, generalmente se contemplan dos etapas: acidogénesis y metanogénesis. Sin embargo, un enfoque más avanzado y detallado incluye cuatro etapas o niveles tróficos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Jewell, 1982).

• **Hidrólisis o licuefacción.** En esta fase, las enzimas liberadas por bacterias hidrolíticas descomponen los compuestos orgánicos fuera de la célula, por lo que estas enzimas se denominan exoenzimas. De esta manera, la hidrólisis consiste en transformar los polímeros en sus monómeros correspondientes.

• **Acidogénesis.** En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que resultan de la hidrólisis son transformados principalmente en ácidos orgánicos como el ácido acético, propiónico y butírico.

• **Acetogénesis.** Se le conoce también acidogénesis intermediaria al proceso en el que los productos resultantes se transforman en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

• **Metanogénesis.** En esta fase del metabolismo, el metano  $CH_4$  se genera a partir del ácido acético o de combinaciones de hidrógeno  $H_2$  y dióxido de carbono  $CO_2$ . Además, puede formarse a partir de otros compuestos como el ácido fórmico y el metanol. La función de las bacterias metanogénicas depende del tipo de sustrato que esté disponible.

En la tabla 2 se detallan las principales reacciones que se presentan en la digestión anaeróbica.

**Tabla 2**

*Reacciones en la digestión anaeróbica*

Etapa	Reacción
	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + 2CO_2 + 2H^+ + 4H_2$
<b>Acidogénesis</b>	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COO^- + 2H_2O + 2H^+$
	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COO^- + 2CO_2 + H^+ + 2H_2$
	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 3H_2$
<b>Acetogénesis</b>	$CH_3CH_2COO^- + 2HCO_3^- \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 3HCOO^-$
	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$
	$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- + 2H_2$
<b>Metanogénesis</b>	$H_2 + \frac{1}{4}HCO_3^- + \frac{1}{4}H^+ \rightarrow \frac{1}{4}CH_4 + \frac{3}{4}H_2O$
	$HCOO^- + \frac{1}{4}H_2O + \frac{1}{4}H^+ \rightarrow \frac{1}{4}CH_4 + \frac{3}{4}HCO_3^-$

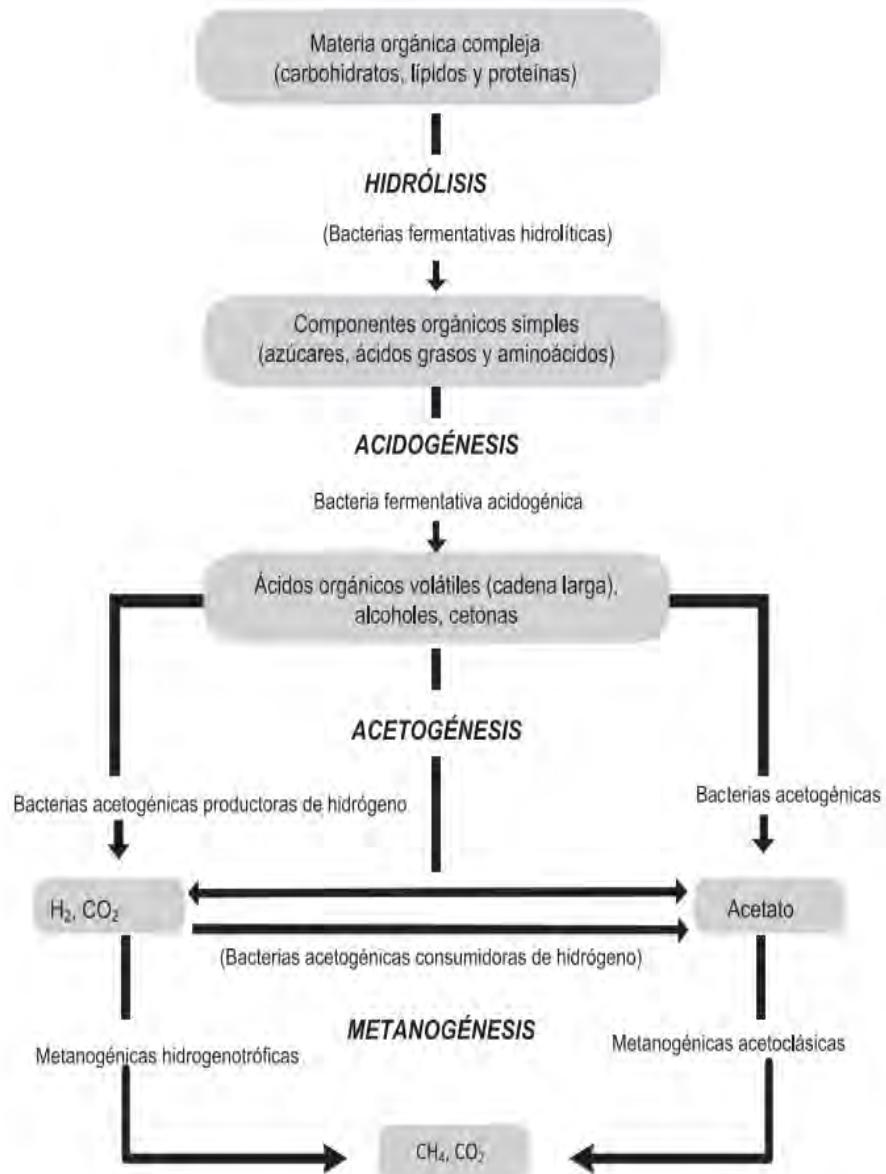
*Fuente:* (Morales *et al.*, 2015)

Las cuatro fases metabólicas que se presentan en la digestión anaerobia, como se ilustra

en la Figura 1, corresponden a un proceso secuencial donde la materia orgánica es transformada gradualmente por diferentes grupos de microorganismos en ausencia de oxígeno.

**Figura 1**

*Etapas de la digestión anaeróbica*



Fuente: (Morales *et al.*, 2015)

## 2.2.5. BIOGÁS

El biogás es una fuente de energía renovable producida mediante la digestión anaeróbica de residuos orgánicos. Su composición varía en función de la fuente y las condiciones de producción, pero suele estar formado por un 45-75% de metano, un 25-65% de dióxido de

carbono y trazas de otros gases (Niemczewska, 2012). El biogás puede contener contaminantes como sulfuro de hidrógeno, siloxanos, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles, que pueden plantear problemas para la producción de energía (Calbry Muzyka *et al.*, 2022).

#### **2.2.5.1. APLICACIONES ENERGÉTICAS DEL BIOGÁS**

El biogás, una fuente de energía renovable producida a partir de residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica, ofrece diversas aplicaciones en la transición energética sostenible. Puede utilizarse para generar electricidad, calefacción, cocina y como combustible para el transporte. La capacidad mundial de generación de electricidad a partir de biogás aumentó un 90% entre 2010 y 2019. El biogás puede utilizarse en diversos sistemas de generación de energía, como motores de combustión interna, turbinas y pilas de combustible (Kabeyi y Olanrewaju., 2022). Además, el biogás sirve como materia prima para producir combustibles sintéticos y productos químicos mediante procesos como la síntesis de Fischer-Tropsch (Damyanova y Beschkov, 2020).

#### **2.2.5.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL BIOGÁS**

El ensayo de Producción Bioquímica de Metano (PBM) se realiza en reactores que garantizan la estanqueidad durante toda la duración del experimento. La literatura describe diversas técnicas e instrumentos para medir el volumen de metano y biogás producido en este tipo de pruebas. En función del método de medición empleado, estos pueden dividirse en manométricos, por desplazamiento de líquidos o mediante jeringas. La elección del método influye directamente en el diseño del reactor utilizado para el ensayo (María y Crespo, 2021).

• **Método manométrico.** El proceso descrito consiste en medir la presión del biogás apilado de un reactor. Para ello, se utiliza un transductor o manómetro, que halla la presión y la convierte en unidades de medida. Con esta información, se puede medir el volumen de biogás producido, aplicando la ley de los gases ideales, tomando en cuenta que el volumen del espacio y la temperatura son continuas. Después de medir la presión, es necesario liberar el gas acumulado con el objetivo de que la presión dentro del reactor vuelva a ser atmosférica, lo que permite hacer nuevas mediciones de biogás. Es importante que la presión en el espacio libre no supere los 3 bares, ya que presiones más altas pueden causar una mayor disolución de  $CO_2$ , afectar el pH del medio y el crecimiento bacteriano, además de poner en riesgo la integridad del reactor (María y Crespo, 2021). En la Figura 2 se ilustra el método manométrico.

**Figura 2**

*Método manométrico*

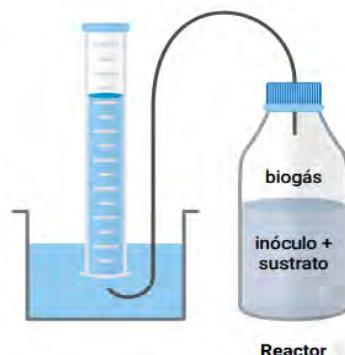


*Fuente:* (María y Crespo, 2021)

• **Método volumétrico por desplazamiento.** El biogás producido puede medirse desplazando una solución en un sistema colector externo al reactor. Para hacerlo, el colector se llena con una solución (como agua, aceite u otras) que, al invertirse en un recipiente, permite que el biogás pase a través de ella. El volumen de solución desplazada es igual al volumen de biogás generado. Sin embargo, una desventaja de este método es que el  $CO_2$  puede disolverse en la solución, lo que lleva a subestimar la cantidad de biogás. El  $CO_2$  es 25 veces más soluble en agua que el metano ( $CH_4$ ) a  $25^{\circ}C$ , lo que puede minimizarse aumentando la salinidad de la solución o ajustando el pH. Aunque esta técnica es simple y económica para realizarlo en el laboratorio, puede presentar fugas de biogás en las conexiones (como agujas y mangüeras). Por eso, es recomendable usar jeringas herméticas y mangüeras impermeables para garantizar un sistema sellado y mantener condiciones anaeróbicas (María y Crespo, 2021). En la Figura 3 se ilustra el método volumétrico por desplazamiento.

**Figura 3**

*Método volumétrico por desplazamiento*



*Fuente:* (María y Crespo, 2021)

• **Método volumétrico por jeringa.** Este procedimiento implica colocar una jeringa a través en la tapa del reactor. La presión que se acumula en el espacio vacío (headspace) desplaza el émbolo de la jeringa, igualando la presión dentro del reactor con la presión atmosférica. El desplazamiento del émbolo corresponde al biogás generado en volumen. Es un procedimiento fácil y efectivo para evitar presiones elevadas dentro del reactor, reduciendo la disolución de  $CO_2$ . Sin embargo, tiene desventajas como el riesgo de error humano, ya que es un proceso manual. Además, para ejecutar la medición es importante quitar el reactor de la incubación, lo que puede afectar los resultados debido al cambio de temperatura. Otro posible inconveniente es que debe haber un ajuste perfecto entre el émbolo y la pared de la jeringa para evitar fugas de gas o fricción que impida el correcto desplazamiento (María y Crespo, 2021). En la Figura 4 se ilustra el método volumétrico de medición de biogás por jeringa

**Figura 4**

*Método volumétrico de medición de biogás por jeringa*



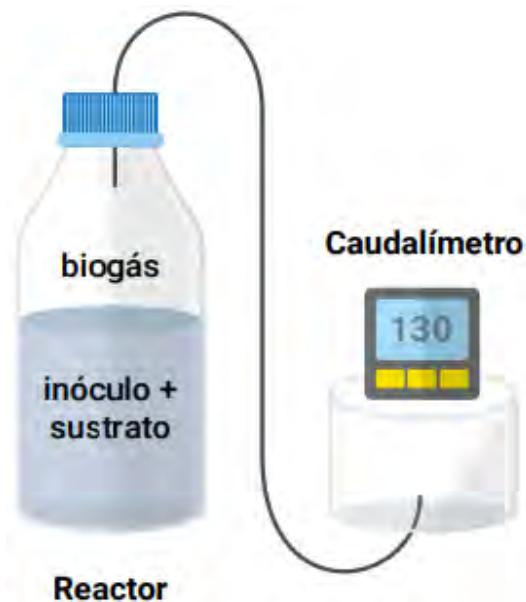
Fuente: (María y Crespo, 2021)

• **Caudalímetro.** Un caudalímetro es un equipo de alta precisión utilizado para medir el volumen de gas. En ensayos de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), debe ser capaz de medir flujos muy bajos de gas de manera continua y liberar el gas para impedir sobrepresiones en el espacio libre. El dispositivo mide el gas mediante el desplazamiento de flotabilidad y líquido, generando un pulso cada vez que un volumen de gas pasa por él. Luego, el volumen se registra a través de un sistema de adquisición de datos. Existen modelos como el Flow Bioprocess Control (sueco) y MilliGascounters RITTER (alemán), diseñados específicamente para medir biogás y metano (María y Crespo, 2021). En la Figura 5 se ilustra la medición de

biogás por conexión a un caudalímetro.

**Figura 5**

*Medición de biogás por conexión a un caudalímetro*



Fuente: (María y Crespo, 2021)

#### 2.2.5.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE METANO

Como todo proceso biológico la digestión anaerobia se efectuará satisfactoriamente o no dependiendo de las condiciones que estén presentes en el medio. Para posibilitar el adecuado desarrollo de los microorganismos que actúan sobre la materia orgánica presente en los residuales que son sometidos a esta biodegradación, siendo los factores principales que influyen en el proceso, los siguientes:

• **Composición del residual.** Dependiendo de las sustancias que conformen el residual orgánicas e inorgánicas así será su biodegradación anaerobia. Por ejemplo, se ha demostrado que en general, mientras más complejo es el residual, más ácidos grasos volátiles (AGV) se producen y al final, el rendimiento de  $CH_4$  es mayor (Menéndez *et al.*, 2003).

• **Relación C:N:P (balance de nutrientes).** Existen diversos criterios sobre la proporción ideal entre la materia orgánica a degradar (carbono) y los principales macronutrientes en un proceso anaeróbico, la cual depende en gran medida del tipo de compuestos presentes en el agua residual. Como regla general, se recomienda que la relación de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno (N) y Fósforo (P) sea aproximadamente 100, 1.75 y 0.25, respectivamente. Es posible alcanzar un balance adecuado de carbono,

nitrógeno y fósforo al combinar diferentes tipos de aguas residuales. Sin embargo, si el nitrógeno está en exceso, puede generarse una alta concentración de amoníaco, lo que podría inhibir el proceso anaeróbico cuando supera ciertos niveles, específicamente más de 3  $kg/m^3$  (Zhang *et al.*, 2022).

• **Inhibidores y estimuladores del proceso.** Existen diversos compuestos y sustancias que resultan letales para los microorganismos involucrados en el proceso anaerobio, ya que inhiben su actividad. Entre estos se incluyen metales pesados, fenoles, tiosulfatos, tiocianatos, cianuros, agentes oxidantes fuertes como cromatos y cloro, además de tensoactivos aniónicos, antibióticos, pesticidas y sales. La toxicidad de estos compuestos depende principalmente de la concentración en la que se encuentren presentes en el efluente o residuo (Appels *et al.*, 2018).

• **Adición de sólidos inertes.** En los últimos tiempos se ha estudiado el efecto de la adición de sólidos suspendidos al proceso anaerobio, encontrándose que a medida que la concentración de estos aumenta se incrementa la eficiencia del proceso. Esto ha ocurrido en residuales muy solubles incrementándose la eficiencia entre 10 y 20% con adición de asbesto o carbón activado (Orrantia *et al.*, 2023).

• **Efecto del pH.** Los efectos del pH sobre la actividad enzimática de los microorganismos se manifiestan principalmente a través de modificaciones en los grupos funcionales hidrolizables de las enzimas, como los grupos carboxilo y amino. Además, el pH provoca cambios en los compuestos no enzimáticos del sistema, afectando la ionización del sustrato y causando la desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas. Estos cambios alteran la conformación tridimensional de las enzimas, lo que puede reducir o incluso inhibir su actividad catalítica. Asimismo, la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) influye en diversas reacciones químicas y biológicas dentro del sistema microbiano (García *et al.*, 2021).

• **Alcalinidad.** El sistema químico principal que controla el pH durante la digestión anaerobia es el equilibrio dióxido de carbono-bicarbonato, regulado mediante una ecuación de equilibrio específica. La cantidad de ácido carbónico presente está vinculada al porcentaje de dióxido de carbono en el digestor. En aguas residuales con baja concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), la concentración del ion bicarbonato se aproxima a la alcalinidad total. Sin embargo, cuando la concentración de AGV aumenta, estos ácidos son neutralizados por la alcalinidad proveniente del bicarbonato, por lo que la alcalinidad total resulta de la suma de la alcalinidad al bicarbonato y la alcalinidad debida a los AGV (Díez *et al.*, 2022).

• **Efecto de la temperatura.** Este parámetro influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él depende mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico, la composición del biogás debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura y el daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores de ésta (Jewell, 1982). Se han definido dos rangos de trabajo donde puede efectuarse satisfactoriamente la anaerobiosis de aguas residuales. Ellos son los mesofílico entre 20 y 45 °C y termofílico entre 45 y 60 °C (Montalvo, 2000).

### 2.3. MARCO CONCEPTUAL

- **Ácidos Grasos Volátiles (AGV):** Productos intermedios generados en las primeras etapas de la digestión anaerobia (como ácido acético, propiónico y butírico), que sirven como sustrato para la producción de metano.
- **Biogás:** Mezcla de gases, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), producida por la descomposición anaerobia de materia orgánica. Es una fuente renovable de energía.
- **Degradación Anaeróbica:** Es un proceso biológico natural mediante el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Es un mecanismo clave para el tratamiento de residuos orgánicos, aguas residuales y lodos, ya que permite reducir la carga contaminante y producir energía renovable (biogás).
- **Digestión anaerobia:** Proceso biológico en el que microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás como subproducto.
- **Hidrólisis:** Primera etapa de la digestión anaerobia en la que los polímeros complejos son descompuestos en compuestos más simples (monómeros) por acción enzimática.
- **Inóculo:** Material biológico rico en microorganismos que se añade al sustrato para iniciar o acelerar el proceso de digestión anaerobia.
- **Lactosuero:** Subproducto líquido generado durante la elaboración del queso, compuesto mayoritariamente por agua, lactosa, proteínas solubles, minerales y vitaminas. Tiene una alta carga orgánica y contaminante si no se trata adecuadamente.

- **Lodos de PTAR:** Residuos semisólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales. Son ricos en materia orgánica y microorganismos anaerobios.
- **Mesofílico:** Rango de temperatura entre 30 °C y 40 °C, ideal para la actividad de microorganismos anaerobios en la mayoría de biodigestores.
- **Metanogénesis:** Etapa final del proceso de digestión anaerobia en la cual los microorganismos metanogénicas transforman compuestos simples como ácido acético e hidrógeno en metano.
- **Metabolismo:** Es el proceso mediante el cual los microorganismos degradan compuestos orgánicos complejos en ausencia de oxígeno, liberando energía mediante rutas fermentativas y reductoras que culminan en la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y biomasa.
- **Microorganismos ruminantes:** Microorganismos presentes en el rumen de animales rumiantes (como el ganado vacuno), con alta capacidad de degradación de materia orgánica compleja bajo condiciones anaerobias.
- **pH:** Medida de acidez o alcalinidad de una solución. Es un factor clave en la actividad microbiana durante la digestión anaerobia.
- **Relación Inóculo-Sustrato (RIS):** Proporción entre la cantidad de inóculo y de sustrato utilizada en un reactor anaerobio. Afecta la eficiencia y estabilidad del proceso de digestión.
- **Sólidos Volátiles (SV):** Fracción de los sólidos totales de una muestra que se volatiliza a temperaturas altas, representando la cantidad de materia orgánica biodegradable.
- **Sustrato:** Material orgánico que sirve de alimento para los microorganismos durante la digestión anaerobia.

## 2.4. HIPÓTESIS

La producción de biogás a partir de lactosuero se ve significativamente influenciada por el tipo de inóculo y por la relación inóculo-sustrato (RIS).

### **CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Tecnología de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y en el Laboratorio de Química Analítica de la Escuela Profesional de Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Formales de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. La investigación correspondió a un estudio de tipo experimental, en concordancia con su objetivo general, y alcanzó un nivel explicativo al analizar la producción de biogás en función de las variables establecidas. El enfoque metodológico fue cuantitativo, sustentado en la recopilación sistemática y el procesamiento de datos medibles para la adecuada interpretación de los resultados.

### **3.1. MUESTRA**

Las muestras fueron:

- El lactosuero proveniente de la planta productora de quesos Sumaqcha de Anta, Cusco, denominado sustrato.
- Lodos digeridos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), denominado inóculo.
- Microorganismos ruminantes provinieron del camal municipal del distrito de San Jerónimo, Cusco, denominado inóculo.

### **3.2. MATERIALES, EQUIPOS E INSTRUMENTOS**

Los materiales, equipos e instrumentos que se utilizó en la investigación se mencionan y clasifican en la Tabla 3.

**Tabla 3***Lista de materiales, equipos e instrumentos*

Materiales				Instrumentos	Equipos	Reactivos
Vidrio	Plástico	Metal	Porcelana			
- Botellas serológicas de 100ml (Pyrex®)	- Embudos (Kimax®)	- Espátulas (Acero inoxidable -	- Crisoles (Isolab)	- Balanza analítica (Eurotech)	- Incubadora (Biobase)	- Agua destilada
- Tubo transparente (Kimax®)	- Jeringa (BD Plastipak®)	Labware®)			- Mufla (horno de copela Nabertherm)	
- Vasos Precipitados (Kimax®)	- Septos o Tapones de rosca (Corning®)	- Soporte universal	(Labware®)		- Estufa (Faithful)	
- Probetas (Pyrex®)						
- Matraz (Pyrex®)	- Botellas de 1l					
- Campana de desecación (Pyrex®)						
- Pipeta milimétrica (Pyrex®)						
- Embudos (Kimax®)						

### 3.3. MÉTODOS

#### 3.3.1. RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA

La muestra de lactosuero se recolectó de la planta productora de quesos Sumaqcha, ubicada en el centro poblado de Ancachuro, distrito de Zurite, provincia de Anta, Cusco, tal como se aprecia en la Figura 6.

**Figura 6**

*Ubicación de la quesería Sumaqcha*



Fuente: Google maps

Se obtuvo un litro de muestra simple, correspondiente al subproducto generado en el proceso de elaboración de queso andino. El material fue almacenado en botella de plástico previamente limpia, debidamente etiquetadas con información sobre el tipo de residuo y la fecha de recolección. Posteriormente, el lactosuero fue conservado en estufa a 37 °C hasta su utilización experimental, a fin de mantener sus características iniciales y evitar procesos de alteración, tal y como se demuestra en la Figura 7.

**Figura 7**

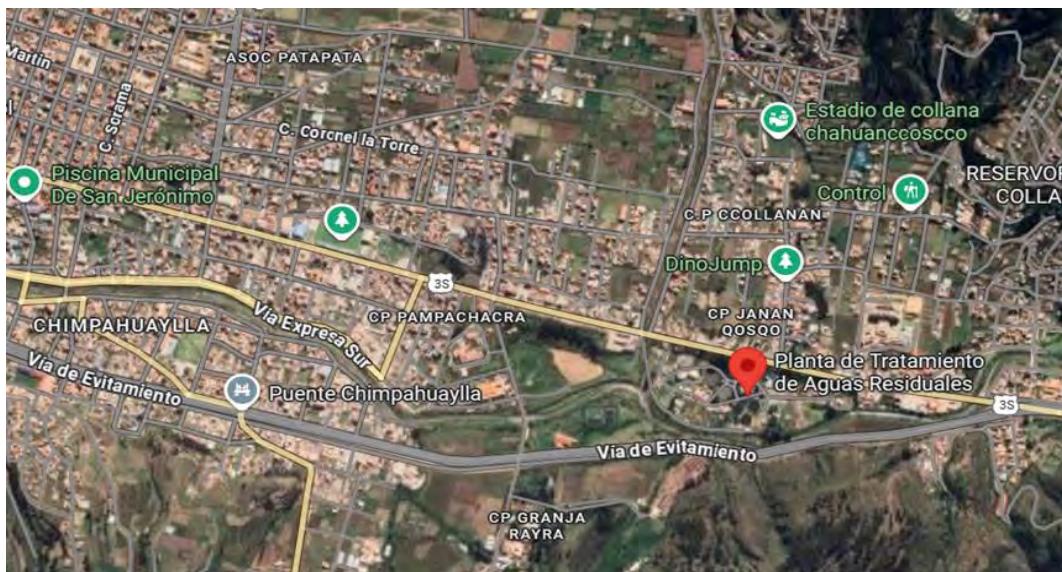
*Recolección del lactosuero*



En la Figura 8 se muestra la ubicación donde se obtuvo la muestra de lodos digeridos teniendo como dirección la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del distrito de San Jerónimo, provincia de Cusco.

### Figura 8

*Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*



Fuente: Google maps

Se recolectó un volumen de un litro, el cual fue almacenado en botella plástica previamente lavada y desinfectada, debidamente etiquetadas con la información correspondiente al tipo de residuo y la fecha de recolección. Posteriormente, la muestra fue conservada en estufa a 37 °C hasta su utilización experimental, tal como se aprecia en la Figura 9.

### Figura 9

*Recolección de los lodos digeridos*



La muestra de microorganismos ruminantes se obtuvo en el camal del distrito de San Jerónimo, Cusco, tal y como se muestra su ubicación en la Figura 10.

**Figura 10**

*Ubicación del camal de San Jerónimo*



Fuente: Google Maps

El material sólido de rumen fue exprimido manual, con el fin de extraer el líquido ruminal, del cual se recolectó aproximadamente un litro. La muestra fue almacenada en botella plástica previamente lavada y desinfectada, etiquetada con la información correspondiente al tipo de residuo y la fecha de recolección, y posteriormente conservada en estufa a 37 °C hasta su utilización experimental, tal como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11**

*Recolección de los microorganismos ruminantes*



En la Figura 12 se aprecia las muestras recolectadas y la estufa donde se conservaron las muestras durante 16 días.

**Figura 12**

*Conservación de las muestras recolectadas*



### 3.3.2. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO (C/N) DE LA MUESTRA DE LACTOSUERO

Se realizó la determinación del carbono (%C) mediante el método de combustión seca a alta temperatura y el porcentaje de nitrógeno (%N) mediante el método AOAC 984.13.

Estas determinaciones se realizaron en la Unidad de Prestación de Servicios de Análisis Químico del Departamento Académico de Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Por tanto, la relación C/N se calculó mediante la ecuación 1.

$$K = \frac{C_1}{N_1} \quad (1)$$

Donde:

$$K = \text{relación } C/N$$

$$C_1 = \% \text{ de carbono contenido en el lactosuero}$$

$$N_1 = \% \text{ de nitrógeno contenido en el lactosuero.}$$

### 3.3.3. CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES

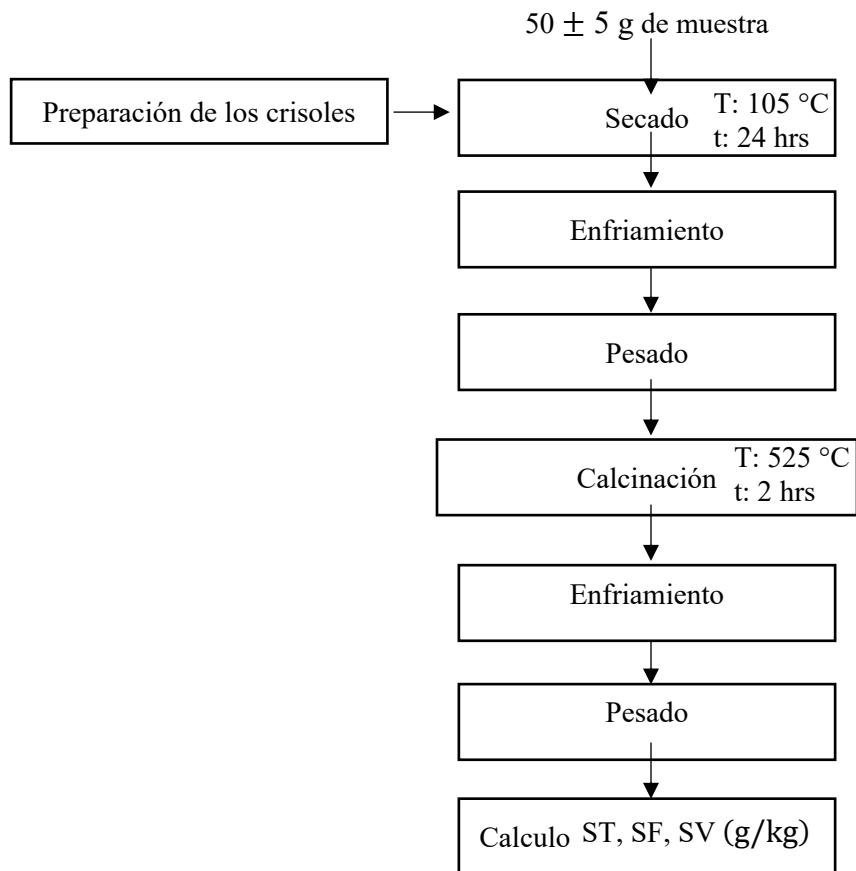
Para la caracterización de los sólidos volátiles del sustrato e inóculos se procedió a realizar con el método 2540 E (Sólidos fijos y volátiles incinerados); este método determina la fracción mineral (sólidos fijos) y la fracción orgánica (sólidos volátiles) de los sólidos totales o suspendidos de la muestra. Los pasos que se realizaron son los siguientes:

1. Se pesó los crisoles limpios y secos ( $P_0$ ).
2. Como muestras, se añadió  $50 \pm 5$  g de lactosuero, rumen, lodos de PTAR y combinado (rumen y lodos) bien homogenizados.
3. Se colocó las muestras en la estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas para eliminar el agua.
4. Se enfrió las muestras en el desecador y se pesó ( $P_1$ ).
5. Se introdujo los crisoles con los sólidos secos en una mufla a  $525^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas para quemar la materia orgánica.
6. Se enfrió los crisoles dentro del desecador.
7. Finalmente se pesó ( $P_2$ ).

En la figura 13 se presenta el diagrama de flujo para la caracterización de los sólidos volátiles y en la figura 14 se muestra el procedimiento realizado.

**Figura 13**

*Diagrama de flujo para la caracterización de los sólidos volátiles*



**Figura 14**

*Procedimiento del método 2540 E (Sólidos fijos y volátiles incinerados)*



Posterior a la experimentación, se procedió al cálculo de los sólidos totales (ST), así como de los sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF), empleando las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente.

$$Sólidos\ totales\ (g/kg) = \frac{(P_1 - P_0)}{m} * 1000 \quad (2)$$

$$Sólidos\ volátiles\ (g/kg) = \frac{(P_1 - P_2)}{m} * 1000 \quad (3)$$

$$Sólidos\ fijos\ (g/kg) = ST - SV \quad (4)$$

Donde:

$m$  = peso de la muestra (g)

$P_0$  = peso del crisol vacío (g)

$P_1$  = peso del crisol más residuo después de la evaporación (g)

$P_2$  = peso del crisol más residuo después de la ignición (g)

ST = Sólidos totales (g/kg)

SV = Sólidos volátiles (g/kg)

### 3.3.4. OBTENCIÓN DE BIOGÁS

La obtención de biogás se realizó en viales de 100 ml a los cuales se añadió diferentes relaciones inóculo-sustrato (RIS). Estas relaciones comprendieron un volumen constante de 20 ml de inóculo y cantidades variables de sustrato, calculados a partir del contenido de sólidos volátiles presentes en el lactosuero e inóculos. A continuación, se realizó el proceso de digestión anaeróbica, para lo cual los viales fueron incubados en una estufa a una temperatura de 37°C, durante un periodo de 16 días. Luego se procedió al monitoreo que incluyó el venteo y registro del volumen de gas producido diariamente.

#### 3.3.4.1. Identificación de variables

- Variables Independientes

- Relación inóculo – sustrato (1, 0.4 y 0.7)
- Tipo de inóculo (rumen, lodos y rumen-lodo)

- **Variables Dependientes**
  - Volumen de biogás ( $cm^3$ )
  - Volumen de metano ( $cm^3$ )
- **Parámetros**
  - Temperatura (37 °C)
  - Tiempo (16 días)

### **3.3.4.2. Diseño de la investigación**

La investigación se desarrolló a través de un diseño factorial, de dos factores y tres niveles. Considerando dos réplicas para cada experimento se realizaron en total 27 experimentos. La Tabla 4 muestra el plan experimental

**Tabla 4**

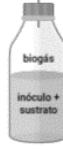
*Plan experimental.*

Nº	Variables independientes		Variable dependiente	
	RIS	Tipo de inóculo	Volumen de biogás	Volumen de metano
1	1	Rumen		
2	1	Lodo		
3	1	Rumen-Lodo		
4	0.7	Rumen		
5	0.7	Lodo		
6	0.7	Rumen-Lodo		
7	0.4	Rumen		
8	0.4	Lodo		
9	0.4	Rumen-Lodo		

El detalle de los 9 experimentos se muestra en la Figura 15

**Figura 15**

*Detalle de los nueve experimentos*

									
<b>Relación inóculo – sustrato</b>	<b>A (RIS=1)</b>	<b>B (RIS=0.7)</b>	<b>C (RIS=0.4)</b>						
<b>Sustrato</b>	Lactosuero	Lactosuero	Lactosuero						
	Lodo	Lodo	Lodo						
<b>Inóculo</b>	Rumen	Rumen	Rumen						
	Lodo + Rumen	Lodo + Rumen	Lodo + Rumen						

### 3.3.4.3. Cálculo de la cantidad de sustrato

Con los datos obtenidos de la caracterización de sólidos volátiles del sustrato y de los inóculos, se calculó la masa del sustrato que se requiere para tener las relaciones de inóculo - sustrato (RIS) igual a 1, 0.7 y 0.4 (Quispe *et al.*, 2022), utilizando la ecuación 6:

$$RIS = \frac{mi*SVi}{ms*SVs} \quad (5)$$

$$m_s = \frac{mi*SVi}{RIS*SVs} \quad (6)$$

Donde:

RIS = Relación del inóculo y sustrato (RIS=1, 0.7 y 0.4)

mi = Masa del inóculo (mi = 20g)

ms = Masa del sustrato, g

SVi = Sólidos volátiles del inóculo, gSV/kg

SVs = Sólidos volátiles del sustrato, gSV/kg

Para la obtención de biogás y medición de su volumen se procedió de la siguiente manera:

1. Se pesó 20 g de inóculo por cada frasco, la cantidad de sustrato se determinó de acuerdo al RIS igual a 1, 0.7 y 0.4 (Ecuación 6).
2. Luego se puso las 27 muestras en la incubadora en un rango de 37°C a condiciones mesofílicas (Del Pópolo *et al.*, 2018).

3. Todos los ensayos fueron tapados con corchos de butilo y sellados con agafes de aluminio. Los biorreactores fueron agitados manualmente 1 vez al día, antes de su medición

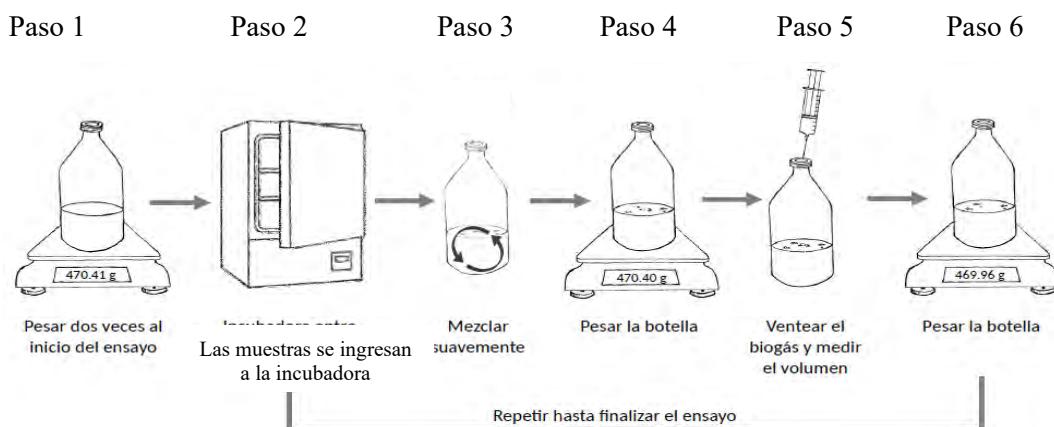
4. Se realizó la experimentación durante 16 días. Cada día se realizó el análisis a las muestras que consistió en lo siguiente:

- ✓ Cada muestra se homogenizó mediante agitación y se procedió a su pesado.
- ✓ Con la ayuda de una jeringa se venteó el biogás para medir el volumen que produce.
- ✓ Luego se pesó la muestra y se devolvió a la estufa para ser evaluada los siguientes días.
- ✓ Los datos recolectados fueron anotados en formato Excel.

La Figura 16 muestra los pasos para el proceso de obtención de biogás y medición de su volumen.

**Figura 16**

*Pasos para el proceso de obtención de biogás y medición de su volumen*



La figura 17 muestra la etapa de medición del biogás.

**Figura 17**

*Medición del volumen de biogás*



### 3.3.4.4. Cálculo del volumen de biogás

Luego de medir diariamente el volumen de biogás, se calculó el volumen estandarizado de biogás contenido en cada muestra con la ecuación 7 (Madrigal Pérez, 2019):

$$V_{std} (cm^3) = \frac{(P - P_{H_2O}) * V_h * 273.15K}{1.013 \text{ bar} * (T + 273.15K)} \quad (7)$$

Dónde:

P = Presión media de la ciudad del Cusco (0.6972 bar)

$P_{H_2O}$  = Presión de vapor del agua (bar)

$V_h$  = Volumen medido ( $cm^3$ )

T = Temperatura promedio en la ciudad del Cusco (10°C según SENAMI)

$V_{std}$  = Volumen estandarizado de biogás ( $cm^3$ )

La estructura de la ecuación 7 ha sido utilizada en protocolos estandarizados para ensayos de potencial bioquímico de metano (BMP), tales como los propuestos por Angelidaki *et al.*, (2009), quienes establecen que el volumen de gas debe expresarse en condiciones estándar y libre de vapor de agua para obtener resultados comparables entre distintos experimentos.

- El factor  $\frac{273.15}{T+273.15}$  corrige el volumen de gas medido a la temperatura estándar (273.15 K)
- El cociente  $\frac{P-P_{H_2O}}{1.013}$  normaliza la presión registrada restando la presión de vapor de agua y ajustándola a una atmósfera estándar (1.013 bar).

Para determinar el volumen real de gas producido en el reactor, fue necesario corregir la presión total registrada restando la fracción correspondiente al vapor de agua. Este valor se obtuvo mediante la ecuación empírica de Magnus, ampliamente utilizada para estimar la presión de vapor en función de la temperatura, la cual se calcula con la ecuación 8:

$$P_{H_2O} = 0.61094 * e^{\frac{17.625 * T_{hs}}{243.04 + T_{hs}}} * 0.01 \quad (8)$$

Donde:

$P_{H_2O}$  = Presión de vapor del agua (kPa)

$T_{hs}$  = Temperatura de incubación (°C)

### 3.3.4.5. Cálculo del volumen de metano

Luego de medir diariamente el volumen de biogás, se calculó el volumen de metano contenido en cada muestra con la ecuación 9:

$$V_{CH_4t}(ml) = V_{std} * \frac{X_{CH_4t}}{100} \quad (9)$$

$V_{std}$  = Volumen estandarizado de biogás (ml)

$X_{CH_4t}$  = Concentración de metano medida en el tiempo (t), normalizada y expresada como fracción en volumen (%).

Esta fórmula proviene de la ley de los gases ideales, aplicada para corregir el volumen medido de biogás a condiciones estándar de presión y temperatura (0°C y 1 atm), además de eliminar la contribución del vapor de agua.

- El término  $\frac{X_{CH_4,t}}{100}$  introduce la fracción volumétrica de metano determinada experimentalmente.

Para estimar la composición del biogás producido, se consideró la relación entre el volumen de gas desplazado en el ensayo y la densidad de los principales componentes del biogás: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>), la cual se utilizó la ecuación 10.

$$X_{CH_4t} = \frac{\rho_{CO_2} - \rho_B}{\rho_{CO_2} - \rho_{CH_4}} \quad (10)$$

Donde:

$X_{CH_4t}$  = Concentración de metano medida en el tiempo (t), normalizada y expresada como fracción en volumen (%).

$\rho_{CO_2}$  = Densidad del dióxido de carbono (0.001977  $\frac{g}{mL}$ )

$\rho_{CH_4}$  = Densidad del metano (0.0007174  $\frac{g}{mL}$ )

Estas densidades derivan de la ley de los gases ideales y se expresan en condiciones estándar (0°C y 1 atm), de este modo permite expresar la composición del biogás en fracciones

volumétricas comparables internacionalmente, garantizando consistencia en los cálculos de producción y calidad del metano.

Para calcular la densidad del biogás se utilizó la ecuación 11.

$$p_B = \frac{\Delta m_b - m_{H_2O}}{V_h} \quad (11)$$

$p_B$  = Densidad del biogás (g/ml)

$\Delta m_b$  = Pérdida de masa registrada al ventear (g)

$m_{H_2O}$  = Masa de vapor de agua en la porción de gas (g).

$V_h$  = Masa del headspace medido (ml).

Esta ecuación surge de un balance de masa aplicado al gas evacuado en cada intervalo, considerando que la pérdida de masa total corresponde a la suma de gas seco y vapor de agua.

Para hallar la concentración de agua presente en el biogás se utilizó la ecuación 12.

$$C_{H_2O} = M_{H_2O} * \frac{P_{H_2O}}{P_{hs} - P_{H_2O}} * \frac{1}{v_b} \quad (12)$$

$M_{H_2O}$  = Masa molar del agua ( $18.02 \frac{g}{mol}$ )

$P_{hs}$  = Presión de biogás en el espacio vacío de la botella (150 kPa)

$v_b$  = Volumen molar de biogás a condiciones estándar ( $22300 \frac{ml}{mol}$ )

La ecuación 12 se deriva de la ley de Dalton y de la ley de los gases ideales, permitiendo calcular la concentración de agua en el biogás a partir de la presión de vapor de saturación, suponiendo que el biogás está cerca de saturación en vapor de agua a la temperatura de incubación, porque se espera que esté próximo al equilibrio en la fase acuosa (Hafner *et al.*, 2020).

El volumen de metano generado en un periodo de tiempo ( $V_{CH_4}$ ), se determinó como la variación entre el volumen de metano observado en el tiempo ( $V_{CH_4t}$ ), y el volumen de metano postventeo de la medición previa  $V_{CH_4(t-1)}$  establecido en la ecuación 13 y 14.

$$V_{CH_4}(ml) = V_{CH_4t}(ml) - V_{CH_4(t-1)}(ml) \quad (13)$$

$$V_{CH_4(t-1)}(ml) = \frac{(1.013bar - P_{(H_2O)}) * V_h * 273K}{1.013 bar * (T + 273K)} * \frac{X_{CH_4(t-1)}}{100} \quad (14)$$

Donde:

$X_{CH_4(t-1)}$  = concentración de metano medida en el último tiempo de muestreo (t-1), normalizada y expresada como fracción en volumen (%).

$V_{CH_4(t-1)}(ml)$  = es el volumen de metano en el reactor luego del postventeo hasta la presión atmosférica de la medición anterior (ml).

- La fracción  $\frac{(1.013 - P_{H_2O})}{1.013}$  corrige el gas medido por la presión parcial de vapor de agua, de acuerdo con la ley de Dalton.
- El factor  $\frac{273.15}{T+273.15}$  corresponde a la corrección de volumen de gas a condiciones normales de presión y temperatura, basada en la ley de los gases ideales.
- Multiplicar por  $V_h$  permite calcular el volumen total de gas en el headspace normalizado.
- Finalmente, se multiplica por la fracción de metano  $X_{CH_4(t-1)}$  para obtener únicamente el volumen de este gas.

### 3.3.4.5.1. Determinación de la cinética de producción de metano

Para caracterizar el comportamiento cinético de la producción de metano en los diferentes tratamientos evaluados, se ajustaron los datos experimentales de metano acumulado al modelo de Gompertz modificado, ampliamente utilizado en procesos de digestión anaerobia por su capacidad para describir adecuadamente las fases de latencia, crecimiento exponencial y estabilización asintótica del proceso (Lay et al., 1996; Zahedi et al., 2013).

El modelo matemático se expresa en la ecuación 15:

$$B(t) = B_0 \cdot \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{R_m \cdot e}{B_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (15)$$

Donde:

$B(t)$  = Producción acumulada de metano en el tiempo  $t$  ( $\text{cm}^3 \text{ CH}_4 / \text{g SV}$ ).

$B_0$  = Potencial máximo de producción de metano ( $\text{cm}^3 \text{ CH}_4 / \text{g SV}$ ).

$R_m$  = Tasa máxima de producción de metano ( $\text{cm}^3 \text{ CH}_4 / \text{g SV.dia}$ ).

$\lambda$  = Tiempo de latencia (días), período anterior al inicio significativo de la producción.

$e$  = Constante de Euler ( $\approx 2,71828$ ).

$t$  = Tiempo de digestión (días).

El ajuste del modelo a los datos experimentales se realizó mediante regresión no lineal por mínimos cuadrados, implementada en el entorno de Google Colab utilizando Python 3.10. Para cada uno de los nueve tratamientos se determinaron los mayores valores de los parámetros cinéticos  $B_0$ ,  $R_m$  y  $\lambda$ , junto con sus respectivos errores estándar.

#### **3.3.4.6. Análisis estadístico**

El análisis estadístico consistirá en determinar el efecto y la significancia de las variables independientes (relación inóculo-sustrato y tipo de inóculo) sobre las variables dependientes (volumen de biogás y volumen de metano). Para ello, se aplicará un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías con un nivel de confianza del 95% ( $\alpha = 0.05$ ), utilizando el software Minitab 18. El ANOVA permitirá contrastar las siguientes hipótesis estadísticas para cada factor e interacción:

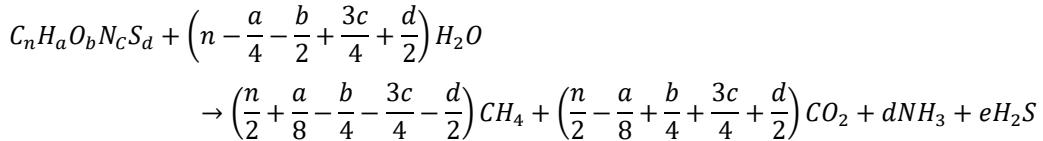
- Hipótesis Nula ( $H_0$ ): No existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la variable dependiente para los diferentes niveles del factor.
- Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ): Al menos una de las medias de la variable dependiente es estadísticamente diferente entre los niveles del factor.

Un valor  $p$  (Valor  $p$ ) inferior a 0.05 se interpretará como evidencia suficiente para rechazar la Hipótesis Nula ( $H_0$ ), concluyendo que la variable independiente analizada tiene un efecto estadísticamente significativo en la producción. Para identificar entre qué niveles específicos existían estas diferencias, se aplicará posteriormente una prueba de comparación múltiple de Tukey.

#### **3.3.4.7. Determinación de la producción teórica de metano**

Para estimar el potencial metanogénico teórico del lactosuero utilizado como sustrato en el proceso de digestión anaerobia, se aplicó el balance de materia mediante el método estequiométrico basado en la ecuación de Buswell y Mueller como se muestra en la ecuación 16. Este método permite calcular la cantidad teórica de metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono

(CO<sub>2</sub>) que puede producir un compuesto orgánico a partir de su fórmula elemental, bajo el supuesto de una biodegradación completa en condiciones anaerobias.



Para aplicar este modelo, se identificó la composición química del principal carbohidrato presente en el lactosuero, la lactosa, cuya fórmula molecular es C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>. Los coeficientes estequiométricos *n*, *a* y *b* fueron sustituidos directamente en la ecuación para determinar las cantidades teóricas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> generadas. Adicionalmente, aunque la lactosa es un carbohidrato que no contiene nitrógeno ni azufre en su estructura molecular, el lactosuero presenta pequeñas fracciones de proteínas y compuestos azufrados provenientes de la leche, los cuales aportan nitrógeno y azufre al sistema. Por ello, el balance de materia se realizó considerando una formulación generalizada del sustrato del tipo C<sub>n</sub>H<sub>a</sub>O<sub>b</sub>N<sub>c</sub>S<sub>d</sub>, donde los coeficientes *c* y *d* representan las fracciones molares de nitrógeno y azufre determinadas a partir del análisis del lactosuero.

### **3.3.5. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS**

Con los resultados obtenidos en el ítem anterior, se seleccionó el RIS y tipo de inóculo con el que se lograron mayor producción de biogás y metano; constituyendo estos los parámetros del proceso.

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO (C/N) DEL LACTOSUERO**

Los resultados del porcentaje de carbono y nitrógeno se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Resultado del análisis de C% y N% del lactosuero*

	<b>Carbono %</b>	<b>Nitrógeno %</b>
<b>Lactosuero</b>	3.09	0.11

A partir de los resultados obtenidos del análisis se determinó la relación carbono – nitrógeno para el lactosuero.

$$K = \frac{3.09 \%}{0.11 \%} = 28$$

Esta relación se encuentra dentro del rango recomendado por González *et al.*, (2022) y Zhang *et al.*, (2022) quienes sugieren que las relaciones C/N deben estar en el rango de 25-30 y 21-30 respectivamente. Esto se sustenta en el hecho que las bacterias en su metabolismo consumen 25 a 30 veces más carbono que nitrógeno. Por tanto, el lactosuero presenta un balance adecuado entre carbono como fuente energética y nitrógeno para la síntesis microbiana. En este sentido, el sustrato presenta condiciones favorables para sostener la actividad de las comunidades metanogénicas y asegurar la estabilidad del proceso.

#### **4.2. CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES**

En la Tabla 6 se evidencia los resultados de sólidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles del sustrato e inóculos.

**Tabla 6**

*ST, SF y SV de las muestras*

<b>Muestra</b>	<b>Sólidos Totales (g/kg)</b>	<b>Sólidos Fijos (g/kg)</b>	<b>Sólidos Volátiles (g/kg)</b>
<i>Lactosuero</i>	54.0617	4.1314	49.9303
<i>Inóculo Lodo</i>	72.1504	33.9155	38.2349
<i>Inóculo Rumen</i>	40.6677	11.4174	29.2502
<i>Inóculo Rumen-Lodo</i>	54.9863	20.6680	34.3180

Los resultados muestran diferencias en el contenido de sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV) entre el sustrato lácteo y los tres distintos inóculos. Según Orhorhoro *et al.*, (2017) en su estudio consideran que un rango de 30–50 g/kg de SV es adecuado para lograr una producción eficiente de biogás en digestión anaerobia.

En ese sentido el sustrato (lactosuero), presentó 54.0617 g/kg de sólidos totales (ST), con un valor muy elevado de sólidos volátiles (SV) que alcanzó el 92% (49.9303 g/kg) y una proporción mínima de sólidos fijos (SF: 4.1314 g/kg). Este perfil evidencia que casi la totalidad de su composición es biodegradable, lo que lo convierte en un sustrato altamente favorable para la producción de biogás. No obstante, tal como señalan Huimin *et al.*, (2022), sustratos con elevada biodegradabilidad pueden generar acumulación de ácidos grasos volátiles y descensos de pH si no se controla adecuadamente la carga orgánica.

Adicionalmente, se determinó el contenido de sólidos volátiles (SV) de los inóculos, dado que este parámetro es indispensable para el cálculo de la relación inóculo-sustrato (RIS). El rumen presentó 29.25 g/kg SV (72% de los ST), el lodo 38.23 g/kg SV (53% de los ST) y la mezcla rumen-lodo 34.31 g/kg SV (62% de los ST). Aunque estos resultados se presentan de manera complementaria al sustrato, evidencian que los inóculos se encuentran dentro del rango considerado en la literatura.

### **4.3. OBTENCIÓN DE CANTIDAD BIOGÁS**

#### **4.3.1. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE SUSTRATO**

La cantidad de sustrato calculado con el RIS y sólidos volátiles. Se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Cantidad de sustrato para cada valor de RIS Y tipo de inóculo*

Nº	RIS	Tipo de inóculo	Cantidad de inóculo (g)	Cantidad de sustrato (g)
1	1	Rumen	20	11.7
2	1	Lodo	20	15.3
3	1	Rumen-Lodo	20	13.7
4	0.7	Rumen	20	16.7
5	0.7	Lodo	20	21.9
6	0.7	Rumen-Lodo	20	19.6
7	0.4	Rumen	20	29.3
8	0.4	Lodo	20	38.3
9	0.4	Rumen-Lodo	20	34.4

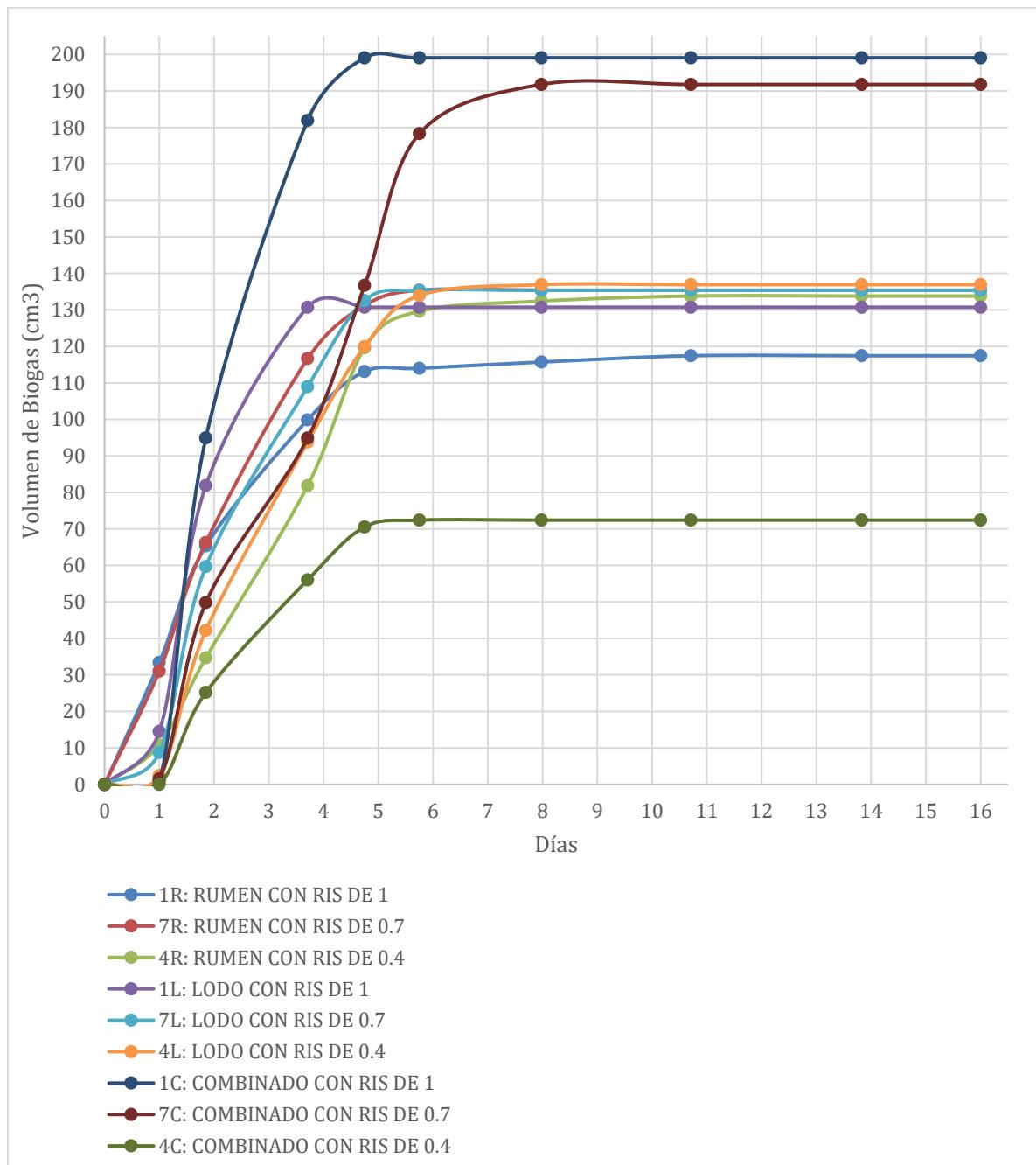
Estos resultados indican que a menor RIS se necesita mayor cantidad de sustrato.

#### 4.3.2. VOLUMEN DE BIOGAS

Los resultados de los 9 experimentos con sus respectivas 2 réplicas (27 experimentos) y promedios se muestran en la Tabla 8 y la Figura 18

**Figura 18**

*Producción de biogás en función al tiempo*



Los resultados en la gráfica mostraron que en la mayoría de los experimentos se identificaron dos fases activas principales: una fase exponencial inicial de alta producción de biogás y una fase de estabilización. Como señala Speece (2008), la producción de biogás típicamente sigue una curva sigmoidea.

El tratamiento con inóculo combinado y una RIS de 1 (experimento 1C) fue el que se desarrolló a mayor velocidad de producción de biogás (mayor pendiente), llegando a su meseta el día 4. Su curva mostró una fase de latencia breve ( $1.39 \text{ cm}^3$  en el día 1), seguida de una fase exponencial extremadamente pronunciada y corta, concentrando la totalidad de su producción en menos de 5 días. Esta curva es un ejemplo de una fase exponencial, donde existiría mayor diversidad de microrganismos y con una carga de sustrato adecuada lo que permitiría una colonización y metabolización rápidas de los compuestos fácilmente degradables, agotándolos en un tiempo récord. Este comportamiento concuerda con lo observado por Abbas *et al.*, (2021), quienes reportaron que la co-digestión con inóculos mixtos resulta en una fase de latencia (acortada) y una fase exponencial intensa, maximizando la producción en el menor tiempo.

Respecto al tratamiento con inóculo combinado y RIS de 0.7 (experimento 7C) presentó una fase exponencial más extendida (menor pendiente), alcanzando su meseta de  $195.85 \text{ cm}^3$  alrededor del día 10, lo que sugiere una degradación más gradual.

En el extremo opuesto, el tratamiento con inóculo combinado y RIS de 0.4 (experimento 4C) mostró una fase de latencia prolongada (producción nula el primer día) y una fase exponencial muy débil, estabilizándose prematuramente en una meseta baja de  $76.25 \text{ cm}^3$ , lo que indica una inhibición temprana del proceso. Este resultado está sustentado por Kothari *et al.*, (2014), quienes explicaron que una RIS demasiado baja supera la capacidad buffer del sistema, causando una acidificación que inhibe a los metanógenos y lleva a la meseta temprana de la producción, tal como se observa.

Al comparar las curvas de todos los inóculos, se destaca que los tratamientos con inóculos individuales (rumen o lodos) tendieron a alcanzar mesetas de producción de biogás a tiempos menores y con menores volúmenes finales a excepción del tratamiento con inóculo combinado, pero con bajo RIS (0.4)

**Tabla 8***Volumen de biogás*

<b>Nombre del inóculo</b>	<b>RIS</b>	<b>Volumen de biogás acumulado (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Media del volumen de biogás acumulado (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (cm<sup>3</sup>)</b>
		116.6		
<i>I</i>		118.3	120.0	4.55
		125.2		
		136.0		
<i>RUMEN</i>	0.7	140.9	137.6	2.83
		136.0		
		133.0		
<i>I</i>	0.4	133.7	134.1	1.46
		135.8		
		130.7		
<i>LODO</i>	0.7	129.7	133.4	5.57
		139.8		
		139.6		
<i>I</i>	0.7	132.6	135.4	3.70
		134.0		
		136.4		
<i>I</i>	0.4	100.8	123.6	19.79
		133.6		
		195.3		
<i>RUMEN- LODO</i>	0.7	193.6	203.0	14.78
		220.0		
		189.3		
<i>I</i>	0.7	176.6	180.9	7.25
		176.9		
		69.5		
<i>I</i>	0.4	88.7	76.3	10.78
		70.6		

El tratamiento de inóculo combinado con RIS 1 (1C) alcanzó la mayor producción acumulada de biogás (203 cm<sup>3</sup>). El tratamiento 7C (inóculo combinado con RIS 0.7) alcanzó

180.9 cm<sup>3</sup>. En contraste, el tratamiento 4C (inóculo combinado con RIS 0.4) presentó el menor rendimiento de todos, con apenas 76.3 cm<sup>3</sup>. Los altos valores de 1C y 7C confirmarían la eficiencia de la sinergia entre los microorganismos hidrolíticos del rumen y la capacidad amortiguadora de los lodos. En cambio, el bajo rendimiento de 4C se explicaría por la escasa biomasa activa frente a la carga de sustrato, lo que limitó la conversión y favoreció la acumulación de intermediarios. Abdallah *et al.*, (2022) señalan que una relación equilibrada entre inóculo y sustrato permite una degradación más rápida y eficiente del lactosuero. Asimismo, Zhang *et al.*, (2019) reportaron que el uso combinado de inóculos incrementa hasta en 40% la producción de biogás respecto a su aplicación individual, lo cual respalda los resultados obtenidos en este estudio.

Los tratamientos con rumen mostraron valores intermedios: 7R (137.6 cm<sup>3</sup>), 4R (134.1 cm<sup>3</sup>) y 1R (120 cm<sup>3</sup>). El rumen evidenciaría una alta capacidad hidrolítica y acidogénica, lo que permitiría una rápida producción de biogás en las primeras jornadas. Sin embargo, al emplearse de manera aislada, la ausencia de capacidad amortiguadora frente a los AGV reduciría la estabilidad del proceso y limitaría la eficiencia de la metanogénesis. Bharadwaj *et al.*, (2024) destacan que los microorganismos ruminales son muy efectivos en la hidrólisis inicial de compuestos complejos, pero requieren inóculos complementarios que aseguren la neutralización de ácidos y sostengan la fase metanogénica, lo cual coincide con el comportamiento observado en este estudio.

Los tratamientos con lodo alcanzaron valores también intermedios: 1L (133.4 cm<sup>3</sup>), 7L (135.4 cm<sup>3</sup>) y 4L (123.6 cm<sup>3</sup>). El lodo mostró un perfil de producción más estable, reflejando su capacidad de amortiguamiento y diversidad microbiana. Sin embargo, su posible limitada fracción de microorganismos hidrolíticos restringió la degradación completa del lactosuero, impidiendo un mayor rendimiento. Del Pópolo *et al.*, (2018) y López (2019) señalan que los lodos, aunque no siempre maximizan la producción de biogás, desempeñan un rol fundamental en la estabilidad del sistema y en la prevención de caídas de pH, lo que explica la menor variabilidad observada en este caso.

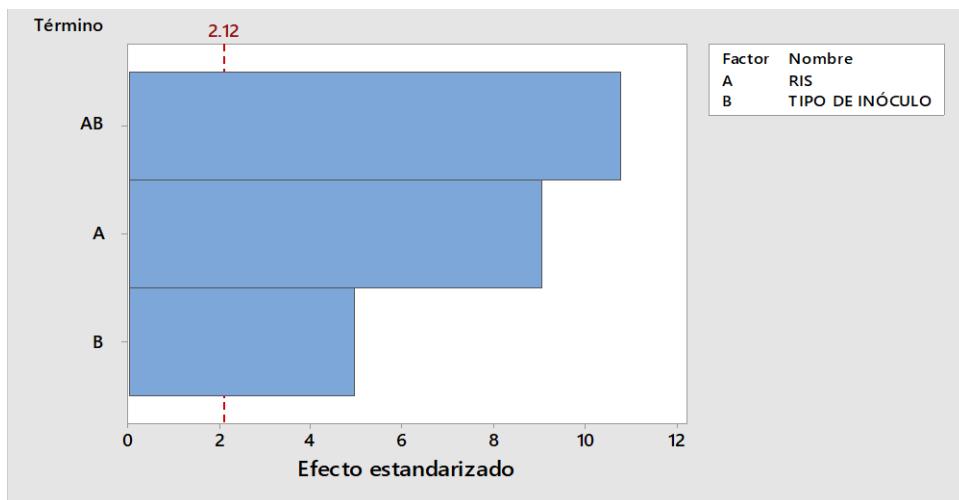
#### **4.3.2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

El análisis estadístico se realizó en el software de Minitab 18, en la cual se obtuvo el diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 19) donde se muestra que todos los factores independientes (RIS, tipo de inóculo e interacción RIS × inóculo) presentan efectos sobre la variable dependiente (volumen de biogás). En términos de magnitud del efecto

estandarizado, la interacción AB (RIS × tipo de inóculo) presentó el mayor efecto ( $\approx 11$ ), seguida del factor A (RIS) con  $\approx 9$  y, en menor medida, el factor B (tipo de inóculo) con  $\approx 5$ . Esta jerarquía evidencia que la variabilidad en la respuesta (volumen de biogás) se explica principalmente por la interacción de ambos factores, antes que por sus efectos individuales.

**Figura 19**

*Diagrama de Pareto de la producción de biogás*



El análisis de varianza (ANOVA) presentado en la Tabla 9 evidenció que tanto la relación inóculo/sustrato (RIS) ( $F = 51.44$ ;  $p = 0.000$ ) como el tipo de inóculo ( $F = 16.22$ ;  $p = 0.000$ ) influyeron significativamente en la producción de biogás. Estos resultados permiten rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ) y concluir que existen diferencias estadísticamente significativas entre al menos un nivel de RIS y entre al menos un tipo de inóculo en cuanto al volumen de biogás producido. Además, la interacción RIS\*Tipo de inóculo resultó altamente significativa ( $F = 48.48$ ;  $p = 0.000$ ), lo que confirma que el rendimiento no depende únicamente de cada factor por separado, sino de la interacción combinada de ambos factores.

**Tabla 9**

*Análisis de varianza de la producción de biogás*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>RIS</b>	2	9798.4	4899.21	51.44	0.000
<b>Tipo de inóculo</b>	2	3089.3	1544.66	16.22	0.000
<b>RIS*Tipo de inóculo</b>	4	18468.9	4617.17	48.48	0.000
<b>Error</b>	16	1523.8		95.24	
<b>Total</b>	26	33062.2			

Los resultados de la prueba de Tukey (Tabla 10) muestran que la RIS 0.4 generó la menor producción acumulada de biogás, con un promedio de  $111.331\text{ cm}^3$ , mientras que las RIS 0.7 y 1.0 alcanzaron valores significativamente mayores ( $151.317\text{ cm}^3$  y  $152.154\text{ cm}^3$ , respectivamente), sin diferencias estadísticas significativas entre ellas.

**Tabla 10**

*Prueba de Tukey para la relación con RIS con una confianza de 95%*

RIS	N	Subconjuntos	
		A	B
1.0	9	152.154	
0.7	9	151.317	
0.4	9		111.331

El análisis estadístico (Tabla 11) muestra que el inóculo combinado alcanzó la mayor producción promedio de biogás ( $153.394\text{ cm}^3$ , grupo A), mientras que los inóculos individuales de lodos ( $130.803\text{ cm}^3$ ) y rumen ( $130.605\text{ cm}^3$ ) presentaron rendimientos menores y estadísticamente similares (grupo B).

**Tabla 11**

*Prueba de Tukey para la relación con el tipo de inóculo con una confianza de 95%*

Tipo de inóculo	N	Subconjuntos	
		A	B
Rumen - Lodo	9	153.394	
Lodos	9		130.803
Rumen	9		130.605

La prueba de Tukey al 95% de confianza (Tabla 12) muestra diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos de producción de biogás, organizando los resultados en tres subconjuntos homogéneos.

En el grupo A se ubicaron los valores más altos, correspondientes a 1.0 Rumen-Lodo ( $202.991\text{ cm}^3$ ) y 0.7 Rumen-Lodo ( $180.937\text{ cm}^3$ ). Estadísticamente, estos tratamientos

constituyen el nivel superior de producción, diferenciándose de los demás por presentar una media significativamente mayor.

El grupo B reunió a los tratamientos con valores intermedios, entre 120.040 y 137.629 cm<sup>3</sup>. Dentro de este subconjunto se encuentran 0.7 Rumen (137.629 cm<sup>3</sup>), 0.7 Lodos (135.385 cm<sup>3</sup>), 0.4 Rumen (134.146 cm<sup>3</sup>), 1.0 Lodos (133.431 cm<sup>3</sup>), 0.4 Lodos (123.592 cm<sup>3</sup>) y 1.0 Rumen (120.040 cm<sup>3</sup>). Estadísticamente, estos resultados conforman un bloque homogéneo que, aunque presenta producciones aceptables, se diferencia de manera significativa respecto al grupo A.

Finalmente, en el grupo C se ubicó únicamente el tratamiento 0.4 Rumen–Lodo (76.255 cm<sup>3</sup>), que se diferenció estadísticamente de todos los demás tratamientos al presentar el valor más bajo de producción.

En términos estadísticos, los resultados confirman que la prueba de Tukey discrimina claramente entre los niveles de producción, estableciendo un orden jerárquico en tres grupos distintos y significativos, demostrando que la combinación de inóculos (Rumen–Lodo) bajo RIS adecuadas constituye la condición más eficiente para maximizar la producción de biogás.

**Tabla 12**

*Prueba de Tukey para la relación con el RIS y el tipo de inóculo con una confianza de 95%*

RIS*Tipo de inóculo	N	Subconjuntos		
		A	B	C
1.0 Rumen – Lodo	3	202.991		
0.7 Rumen - Lodo	3	180.937		
0.7 Rumen	3		137.629	
0.7 Lodos	3		135.385	
0.4 Rumen	3		134.146	
1.0 Lodos	3		133.431	
0.4 Lodos	3		123.592	
1.0 Rumen	3		120.040	
0.4 Rumen - Lodo	3			76.255

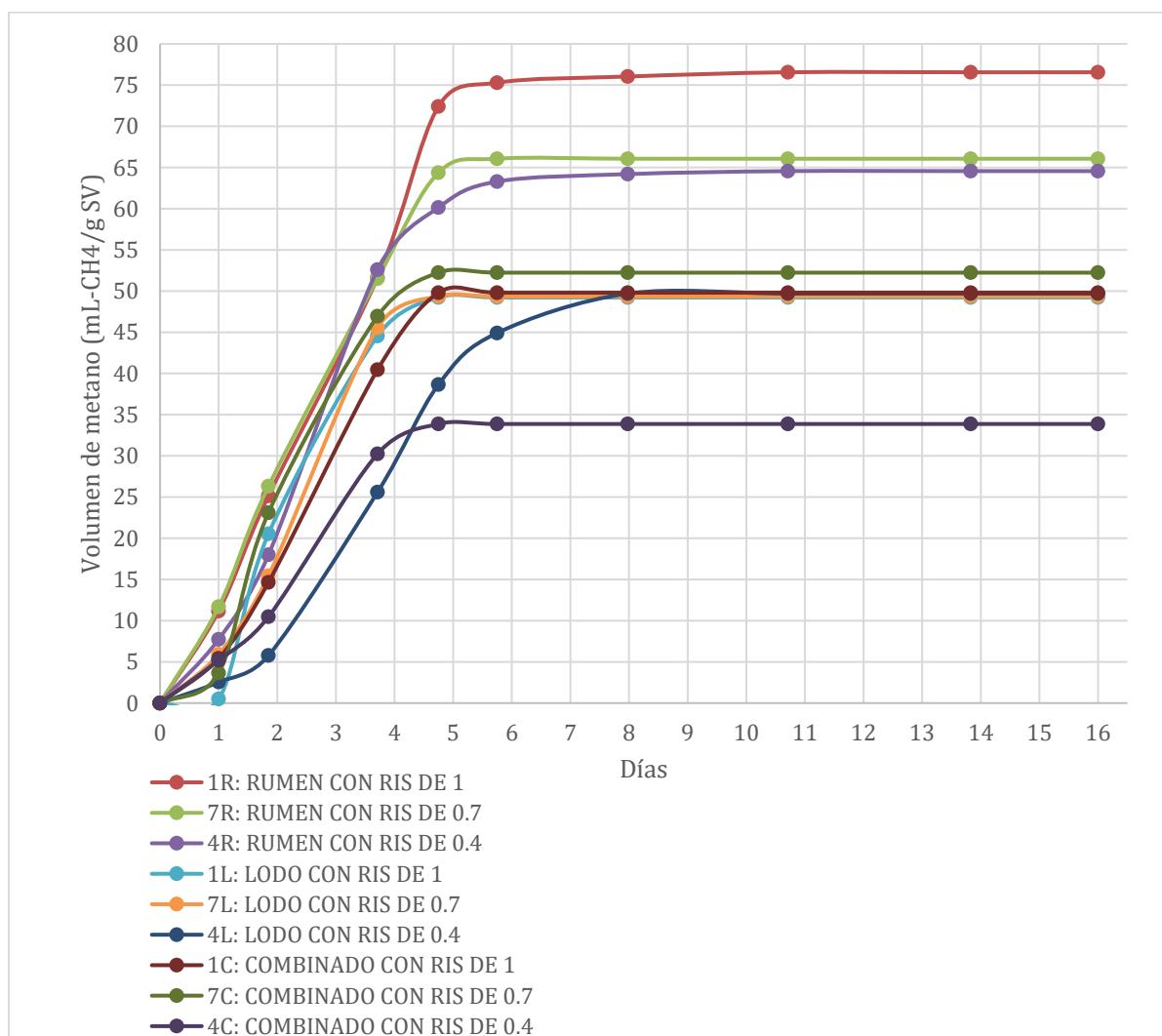
## 4.4. OBTENCIÓN DE CANTIDAD DE METANO (CALIDAD BIOGÁS)

### 4.4.1. VOLUMEN DE METANO

En la Figura 20 se muestra los resultados de la evolución temporal de la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) a lo largo del periodo de monitoreo para los diferentes inóculos y relaciones inóculo/sustrato (RIS). El comportamiento de las curvas evidencia variaciones significativas en la eficiencia de cada tratamiento, lo que permite analizar con mayor precisión la influencia tanto del tipo de inóculo como de la RIS sobre la capacidad metanogénica.

**Figura 20**

*Producción de metano en función al tiempo*



Los resultados en la gráfica mostraron que en la mayoría de los experimentos se identificaron dos fases activas principales: una fase exponencial inicial de alta producción de metano y una fase de estabilización o meseta donde la producción neta cesa. Como señalan Speece (2008), la producción de metano típicamente sigue una curva sigmoidea.

El tratamiento con inóculo de rumen y RIS de 1 (experimento 1R) fue el que produjo mayor cantidad de metano (mayor pendiente) mostrando una fase exponencial prolongada y activa hasta el día 4.75, seguida de una meseta estable, lo que indicaría que el inóculo de rumen, sería rico en microorganismos metanogénicos, capaz de mantener una alta actividad metabólica tras una fase de latencia corta. Esto concuerda con Mata-Alvarez et al. (2014), quienes señalaron que inóculos con alta diversidad metanogénica, como el rumen, suelen mostrar fases exponenciales más largas y mayores producciones acumuladas de metano.

En relación al tratamiento con inóculo combinado y RIS de 0.7 (experimento 7C) presentó una producción acelerada, llegando a una meseta alrededor del día 4.75, lo que indicaría una degradación eficiente, pero con un potencial metanogénico limitado

En contraste al tratamiento con inóculo combinado y RIS de 0.4 (experimento 4C) mostró el menor rendimiento, estabilizándose prematuramente en una meseta baja a partir del día 4.75. Esto probablemente se deba a una acidificación temprana del medio. Chen et al. (2008), quienes demostraron que una RIS baja puede conducir a una acumulación de ácidos y una caída del pH, inhibiendo la actividad metanogénica y resultando en una meseta prematura de la producción de metano

Los tratamientos con inóculos de lodos y combinados mostraron mesetas más bajas y tempranas.

En la Tabla 13 se resumen los valores acumulativos del metano alcanzados en el experimento.

**Tabla 13**

*Volumen de metano*

Nombre del inóculo	RIS	Volumen de metano acumulado ( $\text{cm}^3$ )	Media del volumen de metano acumulado ( $\text{cm}^3$ )	Desviación estándar ( $\text{cm}^3$ )
RUMEN		71.7766		
	1	78.6854	76.555	3.84
		79.2036		
0.7		66.2839		
		66.2839	66.060	0.39
		65.6115		

		63.0068		
	0.4	66.8002	64.559	1.92
		63.8714		
		48.4019		
	1	49.8078	49.222	0.72
		49.4550		
		50.3102		
LODO	0.7	49.0385	49.352	0.81
		48.7070		
		50.0214		
	0.4	49.7314	49.694	0.33
		49.3290		
		50.0721		
	1	50.4419	49.805	0.78
		48.9012		
RUMEN-		51.6662		
LODO	0.7	52.7102	52.236	0.23
		52.3310		
		34.2098		
	0.4	33.2545	33.871	0.49
		34.1494		

El tratamiento con inóculo de rumen y RIS 1.0 (1R) mostró el mayor porcentaje de metano (63.8%), lo que indicaría mejor calidad biogás. Esto probablemente facilitó la actividad metanogénica: mayor abundancia de arqueas y bacterias hidrolíticas que acelerarían la conversión de sustratos. Los RIS menores (0.7 y 0.4) del mismo inóculo mantienen buen metano, pero la fracción disminuye (~48%). Según Curilla *et al.*, (2022) y Barrena *et al.*, (2017), resaltan que la eficiencia del proceso depende tanto de la proporción inóculo-sustrato como de la calidad microbiana del inóculo.

Los tratamientos con lodo (1L, 7L y 4L) mostraron valores finales más bajos, entre 49.22 y 49.69  $\text{cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ . Aunque los lodos contienen comunidades anaerobias, su capacidad de generar metano a partir de lactosuero fue limitada, probablemente por la menor abundancia de arqueas metanogénicas activas. Esto se alinea con lo reportado por Del Pópolo

*et al.*, (2018) y López (2019), quienes observaron que los lodos suelen cumplir un rol estabilizador del proceso, pero no necesariamente garantizan altos niveles de metanogénesis cuando se emplean de forma aislada.

Los tratamientos combinados (rumen con lodo) presentaron resultados intermedios, aunque inferiores al rumen solo. El mejor desempeño correspondió a 7C ( $52.24\text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ), seguido por 1C ( $49.80\text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ) y 4C ( $33.87\text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ). La combinación favorecería parcialmente la hidrólisis, pero no sostendría una metanogénesis eficiente, lo que posiblemente genere desbalances microbianos o competencia entre poblaciones. Este resultado difiere de lo reportado por Zhang *et al.*, (2019), quienes encontraron que la mezcla de inóculos generó una sinergia positiva en residuos agrícolas, con mayor producción de metano. En este caso, la falta de complementariedad entre rumen y lodo indicaría que la comunidad microbiana depende del tipo de sustrato.

#### 4.4.1.1. ANÁLISIS CINÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE METANO

Los parámetros cinéticos obtenidos para cada tratamiento se presentan en la Tabla 14. El modelo mostró un excelente ajuste a los datos experimentales, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0,99 en todos los casos, confirmando su idoneidad para describir la cinética de producción de metano.

**Tabla 14**

*Parámetros cinéticos del modelo de Gompertz*

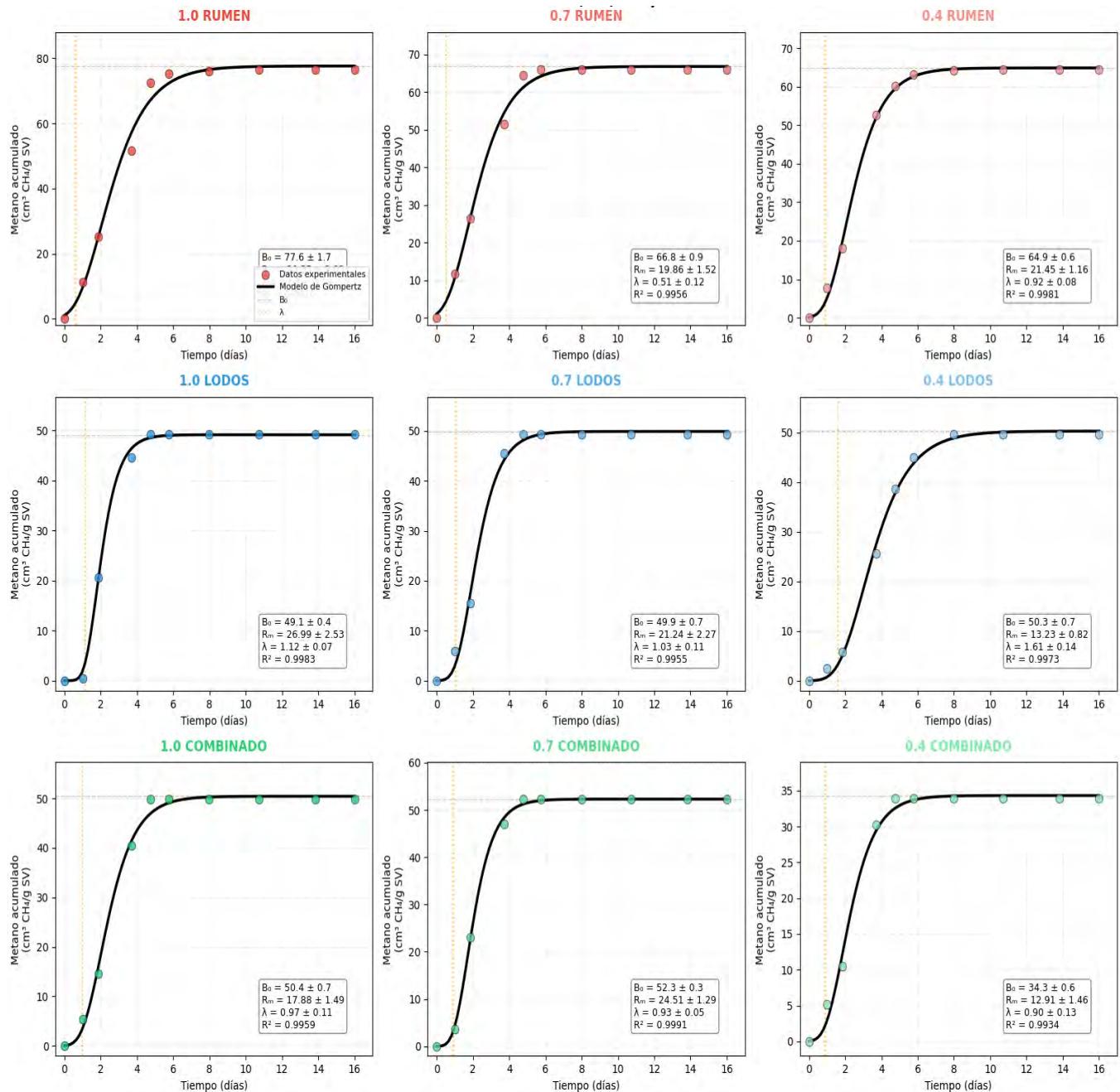
RIS*Tipo de inóculo	$B_0 \pm \text{error}$ ( $\text{cm}^3/\text{g SV}$ )	$R_m \pm \text{error}$ ( $\text{cm}^3/\text{g SV.día}$ )	$\lambda \pm \text{error}$ (días)	$R^2$
1.0 Rumen	$77,59 \pm 1,67$	$20,35 \pm 2,03$	$0,63 \pm 0,19$	0,9910
0.7 Rumen	$66,80 \pm 0,93$	$19,86 \pm 1,52$	$0,51 \pm 0,12$	0,9956
0.4 Rumen	$64,89 \pm 0,63$	$21,45 \pm 1,16$	$0,92 \pm 0,08$	0,9981
1.0 Lodos	$49,09 \pm 0,41$	$26,99 \pm 2,53$	$1,12 \pm 0,07$	0,9983
0.7 Lodos	$49,88 \pm 0,70$	$21,24 \pm 2,27$	$1,03 \pm 0,11$	0,9955
0.4 Lodos	$50,30 \pm 0,67$	$13,23 \pm 0,82$	$1,61 \pm 0,14$	0,9973
1.0 Rumen – Lodo	$50,42 \pm 0,70$	$17,88 \pm 1,49$	$0,97 \pm 0,11$	0,9959
0.7 Rumen - Lodo	$52,29 \pm 0,32$	$24,51 \pm 1,29$	$0,93 \pm 0,05$	0,9991
0.4 Rumen - Lodo	$34,32 \pm 0,59$	$12,91 \pm 1,46$	$0,90 \pm 0,13$	0,9934

La Figura 21 muestra los ajustes individuales del modelo de Gompertz modificado a los datos experimentales de producción acumulada de metano para cada uno de los nueve tratamientos evaluados. Cada gráfico presenta la curva experimental (puntos) y la curva teórica del modelo (línea continua),

La Figura 22 presenta una comparación gráfica de los parámetros cinéticos del modelo de Gompertz obtenidos para los nueve tratamientos

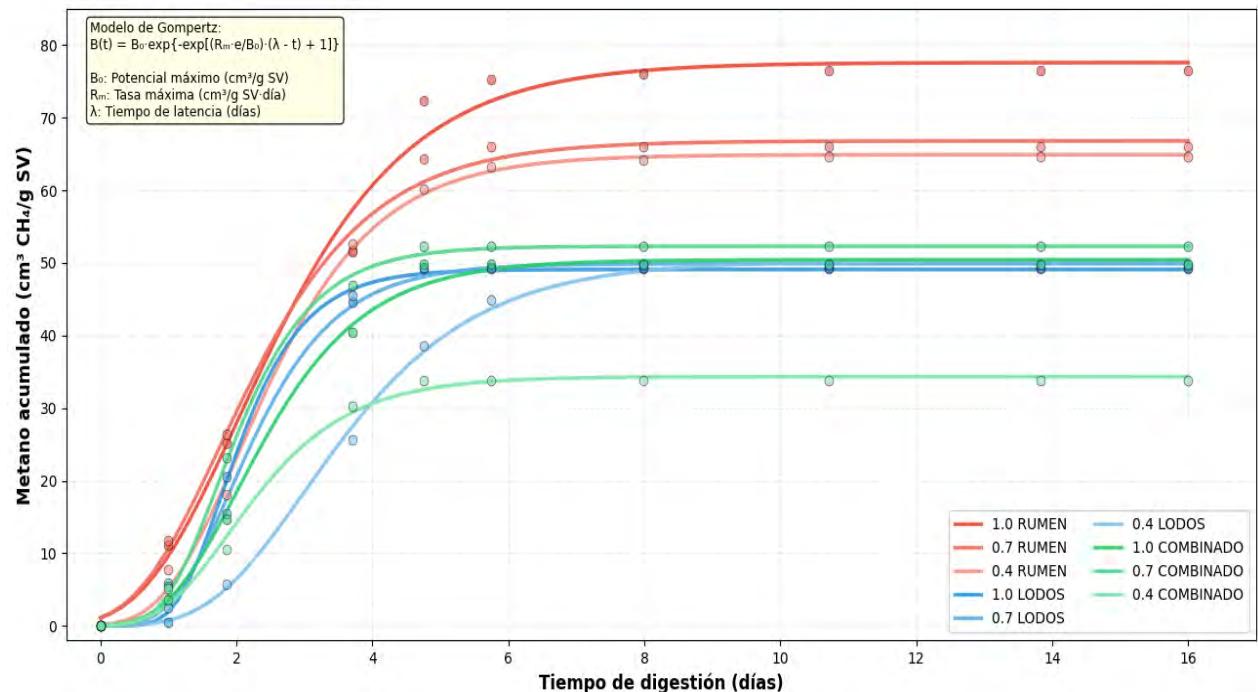
**Figura 21**

*Cinética de producción de metano del modelo de Gompertz*



**Figura 22**

*Comparación cinética de producción de metano del modelo de Gompertz*



Los resultados muestran que el tratamiento 1R (1.0 RIS con inóculo de rumen) presentó el mayor potencial metanogénico ( $B_0$ ), con un valor de 77,59 cm<sup>3</sup>/g SV. El rango de  $B_0$  para todos los tratamientos varió entre 34,32 y 77,59 cm<sup>3</sup>/g SV. Este intervalo se encuentra dentro de lo reportado en la literatura para residuos lignocelulósicos. En su protocolo estandarizado para la determinación del Potencial Bioquímico de Metano (BMP), Holliger et al. (2016) documentan valores típicos de  $B_0$  entre 30 y 85 cm<sup>3</sup>/g SV para una amplia gama de sustratos orgánicos complejos. La variabilidad observada en el presente estudio puede atribuirse principalmente al tipo de inóculo, donde el rumen, adaptado a degradar material fibroso, mostró una mayor eficiencia en la conversión del RIS.

Con respecto a la tasa máxima de producción de metano ( $R_m$ ), el tratamiento con 1.0 de RIS y de inoculo lodos registró el valor más elevado (26,99 cm<sup>3</sup>/g SV·día), lo que sugiere una alta actividad metanogénica específica y una fase exponencial de producción más intensa. El tratamiento 0.4 Rumen también mostró una  $R_m$  alta (21,45 cm<sup>3</sup>/g SV·día). El rango general de  $R_m$  fue de 12,91 a 26,99 cm<sup>3</sup>/g SV·día. Estos valores son consistentes con los reportados por Koch et al. (2015), quienes encontraron  $R_m$  entre 10 y 30 cm<sup>3</sup>/g SV·día en la digestión anaerobia de residuos agroindustriales, vinculando tasas más altas con inóculos bien aclimatados.

En cuanto al tiempo de latencia ( $\lambda$ ), que refleja el período de adaptación microbiana antes del inicio de la producción apreciable de metano, el tratamiento 0.7 Rumen presentó el menor valor (0,51 días). Esto indica una rápida activación de los microorganismos ruminantes. Por el contrario, el tratamiento 0.4 Lodos mostró el mayor tiempo de latencia (1,61 días), lo que podría asociarse a una menor concentración de inóculo o a la necesidad de un período de aclimatación más prolongado para este consorcio específico. Los valores de  $\lambda$  oscilaron entre 0,51 y 1,61 días, parámetros que concuerdan con los observados en estudios de codigestión, donde Raposo et al. (2011) señalaron tiempos de latencia típicos entre 0,5 y 2 días para sistemas batch.

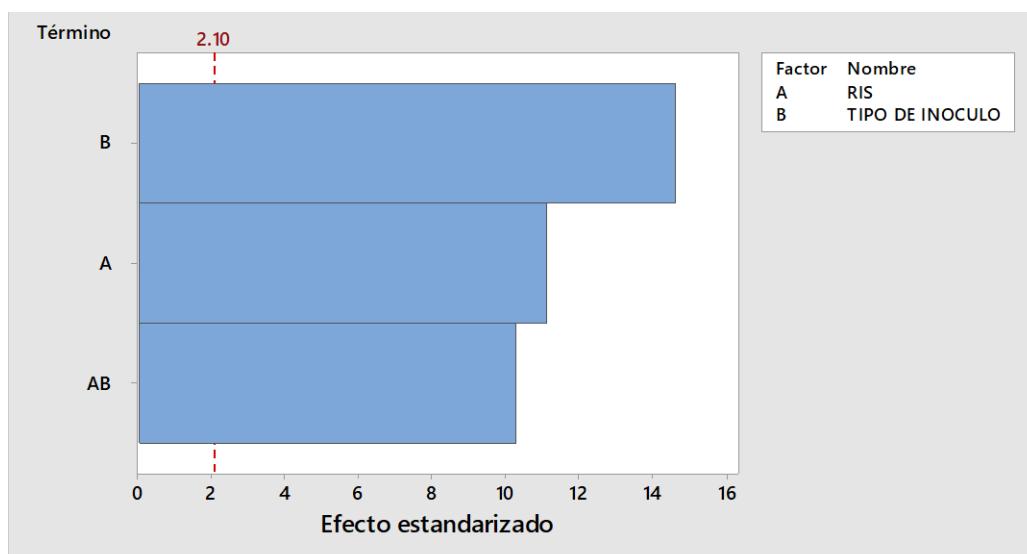
La elevada bondad de ajuste ( $R^2 > 0,99$ ) confirma que el modelo de Gompertz modificado es una herramienta robusta para predecir el rendimiento y la dinámica temporal de la producción de metano en estos sistemas. Los resultados indican que, para maximizar el potencial de metano ( $B_0$ ) del RIS, el inóculo de rumen puro presenta el mejor desempeño.

#### 4.4.1.2. ANÁLISIS ESTADISTICO

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 23) muestra que el tipo de inóculo (factor B) es el elemento más determinante en la producción de metano. En segundo lugar, la relación inóculo/sustrato (RIS, factor A) también presenta un efecto, aunque de menor magnitud que el tipo de inóculo. Finalmente, la interacción entre RIS y tipo de inóculo (AB), muestran un efecto menor que ambos factores.

**Figura 23**

*Diagrama de Pareto de la producción de metano*



El análisis de varianza (ANOVA) presentado en la Tabla 15 mostró que tanto la relación inóculo/sustrato (RIS), el tipo de inóculo y su interacción tuvieron efectos estadísticamente significativos sobre la producción de metano ( $p < 0.05$ ). Estos resultados permiten rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ) y concluir que existen diferencias significativas en la producción de metano entre al menos un nivel de RIS, un tipo de inóculo y una combinación de ambos. En particular, el tipo de inóculo presentó el efecto más marcado ( $F = 546.52$ ;  $p = 0.000$ ), explicando la mayor proporción de variabilidad en los datos. La RIS también mostró un efecto altamente significativo ( $F = 75.25$ ;  $p = 0.000$ ), mientras que la interacción RIS\*Tipo de inóculo ( $F = 42.81$ ;  $p = 0.000$ ) confirmó que la producción de metano no depende únicamente de cada factor de forma aislada, sino de su acción combinada.

**Tabla 15**

*Análisis de varianza de la producción de metano*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>RIS</b>	2	399.33	199.66	75.25	0.000
<b>Tipo de inóculo</b>	2	2900.34	1450.17	546.52	0.000
<b>RIS*Tipo de inóculo</b>	4	454.38	113.60	42.81	0.000
<b>Error</b>	18	47.76	2.65		
<b>Total</b>	26	3801.81			

El análisis estadístico mediante la prueba de Tukey (Tabla 16) evidenció diferencias significativas en la producción de metano según la relación inóculo-sustrato (RIS). Los valores medios fueron de  $58.53 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$  para RIS 1.0,  $55.88 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$  para RIS 0.7 y  $49.37 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$  para RIS 0.4, ubicándose cada tratamiento en subconjuntos distintos (A, B y C, respectivamente). Este resultado indica que cada nivel de RIS generó producciones de metano estadísticamente diferentes entre sí, con una tendencia clara: RIS 1.0 > RIS 0.7 > RIS 0.4.

**Tabla 16***Prueba de Tukey para la relación de RIS con una confianza de 95%*

RIS	N	Subconjuntos		
		A	B	C
1	9	58.5273		
0.7	9		55.8825	
0.4	9			49.3749

El análisis estadístico mediante la prueba de Tukey (Tabla 17) mostró diferencias significativas en la producción de metano en función del tipo de inóculo empleado. El rumen alcanzó el mayor promedio con  $69.06 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ , ubicándose en el subconjunto A, mientras que el lodo registró  $49.42 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$  en el subconjunto B y la mezcla rumen–lodo obtuvo el valor más bajo con  $45.30 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ , agrupándose en el subconjunto C. Este comportamiento indica que cada tipo de inóculo presentó un rendimiento metanogénico estadísticamente diferente.

**Tabla 17***Prueba de Tukey para la relación tipo de inóculo con una confianza de 95%*

Tipo de inóculo	N	Subconjuntos		
		A	B	C
Rumen	9	69.0582		
Lodo	9		49.4225	
Rumen - Lodo	9			45.3040

El análisis de la prueba de Tukey para la interacción entre la relación inóculo/sustrato (RIS) y el tipo de inóculo (Tabla 18) mostró diferencias estadísticamente significativas en la producción de metano. El tratamiento con inóculo rumen y RIS 1.0 alcanzó la media más alta ( $76.56 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ), conformando un subconjunto estadísticamente distinto (A) y consolidándose como el tratamiento más eficiente.

En segundo lugar, se ubicaron los tratamientos con rumen a RIS 0.7 ( $66.06 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ) y 0.4 ( $64.56 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ), los cuales formaron un subconjunto diferente (B).

Los tratamientos con mezcla rumen–lodo y lodo solo se agruparon en subconjuntos inferiores (C), con valores entre  $49.22$  y  $52.23 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ , sin mostrar diferencias relevantes entre ellos. Finalmente, el tratamiento 0.4 Rumen-Lodo presentó la media más baja ( $33.87 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ), ubicándose en un subconjunto independiente (D).

**Tabla 18**

*Prueba de Tukey para la relación con el RIS y el tipo de inóculo con una confianza de 95%*

RIS*Tipo de inóculo	N	Subconjuntos			
		A	B	C	D
<i>1.0 Rumen</i>	3	76.5552			
<i>0.7 Rumen</i>	3		66.0598		
<i>0.4 Rumen</i>	3			64.5595	
<i>0.7 Rumen-Lodo</i>	3				52.2358
<i>1.0 Rumen-Lodo</i>	3				49.8051
<i>0.4 Lodo</i>	3				49.6939
<i>0.7 Lodo</i>	3				49.3519
<i>1.0 Lodo</i>	3				49.2216
<i>0.4 Rumen-Lodo</i>	3				33.8712

#### 4.4.1.3. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN TEÓRICA DE METANO

El cálculo del potencial metanogénico teórico mediante la ecuación de Buswell permitió establecer un valor de referencia para determinar la eficiencia real de producción de metano en los tratamientos evaluados. A partir de la composición elemental de la lactosa, principal carbohidrato del lactosuero, se determinó un rendimiento teórico de  $380 \text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{g}$  de sustrato.

La tabla 19 presenta la comparación entre el metano teórico calculado mediante la ecuación de Buswell y los valores experimentales obtenidos para los nueve tratamientos evaluados.

**Tabla 19***Comparación entre metano teórico y experimental*

RIS	Tipo de Inóculo	CH <sub>4</sub> Teórico	CH <sub>4</sub> Experimental	Eficiencia
		(cm <sup>3</sup> /gSV)	(cm <sup>3</sup> /gSV)	(%)
<b>1.0</b>	<b>Rumen</b>	380	76.56	20.15 %
<b>1.0</b>	<b>Lodo</b>	380	49.22	15.95 %
<b>1.0</b>	<b>Rumen-Lodo</b>	380	49.81	13.11 %
<b>0.7</b>	<b>Rumen</b>	380	66.06	17.38 %
<b>0.7</b>	<b>Lodo</b>	380	49.35	12.99 %
<b>0.7</b>	<b>Rumen-Lodo</b>	380	52.24	13.75 %
<b>0.4</b>	<b>Rumen</b>	380	64.56	16.99 %
<b>0.4</b>	<b>Lodo</b>	380	49.69	13.08 %
<b>0.4</b>	<b>Rumen-Lodo</b>	380	33.87	8.91 %

Los resultados muestran que el metano experimental obtenido en los nueve tratamientos representa entre 8.91% y 20.15% del valor teórico calculado mediante la ecuación de Buswell. Esta diferencia evidencia que la conversión del lactosuero fue parcial, lo cual coincide con estudios previos que reportan limitaciones en la degradación completa de suero lácteo en sistemas Batch (Zambrano, 2016; Curilla & Diego, 2022).

El rumen con RIS 1.0 alcanzó la mayor eficiencia (20.15 %), debido a su alta actividad hidrolítica y metanogénico, tal como señalan Marañón et al. (2012). En contraste, los tratamientos con lodo de PTAR mostraron eficiencias bajas y estables (~13 %), lo que concuerda con los hallazgos de Comino, Riggio y Rosso (2012), quienes indican que el lodo presenta limitaciones en la degradación de compuestos lácteos.

La mezcla rumen–lodo presentó resultados intermedios, pero sin superar al rumen puro, lo que sugiere ausencia de sinergia microbiana eficaz, tal como también ha sido reportado por Vivekanand et al. (2018). La brecha entre el valor teórico y experimental puede explicarse por acumulación de AGV e inhibiciones parciales, fenómenos mencionados en estudios sobre digestión de lactosuero (Mamani & Sullca, 2023).

Los resultados confirman que el rendimiento depende principalmente del tipo de inóculo y del RIS, siendo el rumen en RIS 1.0 la condición más favorable para maximizar la producción de metano.

## **4.5. PARÁMETROS DEL PROCESO**

### **4.5.1. PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

De los resultados de la Tabla 8 del volumen de biogás se determinó que:

Para un RIS igual 1 y tipo de inóculo combinado (lodo y rumen) se logró el mayor volumen de biogás ( $203.0\text{ cm}^3$ ); constituyendo estos los parámetros del proceso.

### **4.5.2. PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO**

De los resultados de la Tabla 13 del volumen de metano se determinó que:

Para las condiciones de mayor producción de biogás se obtuvo solo  $49.805\text{ cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$ ; sin embargo, para un **RIS igual 1 y tipo de inóculo rumen** se logró el mayor volumen de metano ( **$76.55\text{cm}^3\text{CH}_4/\text{gSV}$** ) que comprende el 63.8% del biogás ( $120\text{ cm}^3$ ); constituyendo estos los parámetros del proceso.

Este resultado concuerda con Zhang *et al.*, (2019) quienes demostraron que los microorganismos ruminantes, por su diversidad y especialización, pueden aumentar la fracción metanogénica del biogás hasta un 65%. De manera similar, Abdallah *et al.*, (2022) señalaron que la inoculación con microrganismos ruminantes genera mayor volumen de metano en comparación con lodo u otros inóculos convencionales, debido a la capacidad del rumen para acelerar la hidrólisis y estabilizar los ácidos grasos volátiles. Así mismo, Del Pópolo *et al.*, (2018) reportaron que la adición de rumen bovino en la digestión de lactosuero incrementó la calidad del biogás, al lograr porcentajes de metano superiores al 60%, destacando que este tipo de inoculación permite procesos más estables y eficientes.

Finalmente, Mamani y Sullca, (2023), compararon distintos inóculos en la digestión de lactosuero y concluyeron que la capacidad del rumen para degradar compuestos lácteos complejos, especialmente lactosa y proteínas, evita la acidificación del medio y garantiza la producción de metano.

## CONCLUSIONES

1. Se logró producir biogás a partir del lactosuero utilizando los tres inóculos (microorganismos ruminantes, lodos y la combinación de estos), teniendo como mayor producción de biogás al inóculo combinado (rumen con lodos) en RIS de 1 con un volumen de biogás de (203 cm<sup>3</sup>).
2. El lactosuero presentó una relación C/N de 28, valor que se encuentra dentro del rango considerado adecuado para la digestión anaerobia. Este equilibrio confirma que el lactosuero es un sustrato apropiado para la producción de biogás.
3. A partir del análisis de sólidos volátiles, el lactosuero presenta una fracción orgánica elevada (92%), lo que respalda su idoneidad para la digestión anaerobia. Complementariamente se calculó los sólidos volátiles de los inóculos para la determinación de masa del sustrato donde tuvieron la siguiente fracción orgánica: el rumen (72%), los lodos (53%) y el inóculo combinado (62%)
4. El análisis estadístico (ANOVA) confirmó que tanto la RIS, el tipo de inóculo y la interacción de ambos ejercen un efecto altamente significativo sobre la producción de biogás y producción de metano ( $p < 0.05$ ). Los valores de RIS bajos (0.4) redujeron notablemente la producción de biogás y metano, mientras que valores intermedios y altos (0.7 y 1.0) favorecieron rendimientos superiores. Asimismo, el inóculo de los microrganismos ruminantes demostró mayor calidad de biogás.
5. La mayor producción de biogás se obtuvo con el inóculo combinado (rumen - lodo) en RIS 1, alcanzando 203 cm<sup>3</sup>, mientras que la mayor producción de metano se registró con el inóculo rumen en RIS 1, con 76.55 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>. En consecuencia, el tratamiento seleccionado corresponde al rumen con RIS 1.0, ya que garantiza un biogás de mayor calidad, aspecto prioritario para su aprovechamiento energético.

## RECOMENDACIONES

1. Se aconseja evitar el uso de RIS menor o igual a (0.4), ya que estas condiciones redujeron de manera significativa la producción de biogás y, en algunos casos, inhibieron la metanogénesis. Los valores intermedios y altos de RIS (0.7–1.0) deben ser priorizados, dado que favorecen el equilibrio microbiano y mejoran la eficiencia del sistema.
2. Aunque en este estudio el lactosuero fue caracterizado a nivel de sólidos volátiles (SV) y relación carbono/nitrógeno (C/N), se recomienda en futuras investigaciones profundizar en la medición de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV), ya que estos constituyen un indicador directo de la actividad microbiana y del equilibrio del proceso anaerobio. Su monitoreo permitiría anticipar posibles inhibiciones, optimizar la carga orgánica aplicada y garantizar una producción más estable y de mayor calidad en términos de metano.
3. Se recomienda que en futuros ensayos se emplee nitrógeno para el sellado de los viales, ya que este gas inerte desplaza de manera efectiva el oxígeno residual, asegurando condiciones estrictamente anaerobias durante todo el proceso de digestión. Esta práctica no solo favorece un inicio más controlado y representativo de la actividad metanogénica, sino que también minimiza riesgos de inhibición microbiana y variabilidad experimental asociada a la presencia de oxígeno.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdallah, M., Greige, S., Beyenal, H., Harb, M., & Wazne, M. (2022). Investigating microbial dynamics and potential advantages of anaerobic co-digestion of cheese whey and poultry slaughterhouse wastewaters. *Scientific Reports*, 12(1). Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14425-1>
- Agualongo, L., Aucatoma, D., Sagnay, D., Santillán, N., & Jácome, C. (2022). Whey, a By-Product from the Dairy Industry: Composition, protein recovery and applications. *Journal of Agro-Industry Sciences*, 4(1), 13–22. doi:<https://doi.org/10.17268/JAIS.2022.002>
- Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996). Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35(4), 601–609.
- Amaral, D., & Silva, J. (2021). Whey in the industry: environmental and valorization impacts. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento*, 41–57. doi:<https://doi.org/10.32749/NUCLEODOCONHECIMENTO.COM.BR/ENVIRONMENTAL-ENGINEERING-EN/WHEY>
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., . . . van Lier, J. B. (2003). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3(2), 117–129.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2018). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Ávila, R., García-Depraet, O., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2021). Enhanced anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by rumen culture pre-treatment for continuous biohythane production. *Renewable Energy*, 173, 350–359.
- Barrena, M., Gamarra, O., Milla, M., Fellenberg, T., & Ordinola, C. (2017). Optimización de la producción de biogás a escala de laboratorio a partir de estiércol de bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*). *Revista de Investigación Para El Desarrollo*

- Sustentable, 3(2), 60–66. doi:<https://doi.org/10.25127/inde.20153.209>
- Bharadwaj, A., Holwerda, E., Regan, J., & Lynd, L. (2024). Enhancing anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by mechanical cotreatment. ResearchGate Logo, 17(1). doi:<http://dx.doi.org/10.1186/s13068-024-02521-5>
- Boylston, T. D. (2019). Byproducts from Butter and Cheese Processing. Byproducts from Agriculture and Fisheries, 107–121. doi:<https://doi.org/10.1002/9781119383956>
- Calbry-Muzyka, A., Madi, H., Rüsch-Pfund, F., Gandiglio, M., & Biollaz, S. (2022). Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. Renewable Energy, 1000–1007. doi:<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.09.100>
- Comino, E., Riggio, V., & Rosso, M. (2012). Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. Revista Bioresource Technology, 114(90), 46-53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.090>.
- Comino, E., Rosso, M., & Riggio, V. (2009). Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix. Bioresource Technology, 100(21), 5072–5078. doi:<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.05.059>
- Curilla, E., & Diego, M. (2022). Efecto del lactosuero en la producción del biogás y las características del bioabono y biol utilizando estiércol de vacuno en un biodigestor Batch en Sicaya - 2021. Repositorio Institucional Continental. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11106>.
- Damyanova, S., & Beschkov, V. (2020). Biogas as a Source of Energy and Chemicals. Biorefinery Concepts, Energy and Products. doi:<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.90558>
- Del Pópolo Grzona, M., Grzona, C. B., & Münnich, K. (2018). Producción de biogás a partir de estiércol bovino y suero lácteo de quesería. Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM 26º. Obtenido de [https://ediunc.bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/12921/26-energia-del-popolo-grzona-mariana-unsl-1.pdf](https://ediunc.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/12921/26-energia-del-popolo-grzona-mariana-unsl-1.pdf).
- Díez Montero, R., De Francisci, D., & Smets, B. F. (2022). The bicarbonate buffer system in anaerobic digestion: Implications for pH stability and process performance. Bioresource Technology, 349. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126848>
- Dinkci, N. (2021). Whey, Waste or Value? World Journal of Agriculture and Soil Science. 6(5). doi:<https://doi.org/10.33552/WJASS.2021.06.000648>
- Fernández Rodríguez, C. (2014). Obtencion de Biogas e Hidrogeno a partir del lactosuero.

Universidad de León.

- Fernández Rodríguez, C., Martínez Torres, E. J., Morán Palao, A., & Gómez Barrios, X. (2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. *Revista ION*, 29(1). Obtenido de [https://www.redalyc.org/journal/3420/342046466005/html/#redalyc\\_342046466005\\_ref25](https://www.redalyc.org/journal/3420/342046466005/html/#redalyc_342046466005_ref25)
- García Depraect, O., Martínez Hernández, S., Reyna, J., & Lebrero, R. (2021). pH control strategies in anaerobic digestion processes: A review. *Bioresource Technology*, 320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124302>
- González, R., Carrillo Peña, D., & Gómez, X. (2022). Anaerobic co-digestion of wastes: Reviewing current status and approaches for enhancing biogas production. *Applied Sciences*, 12(17), 8884. doi:<https://doi.org/10.3390/app12178884>
- González, S., Guerra, R., Trupiano, A., Castañeda, M. L., Figueroa, M., & Cuevas, C. (s.f.). Tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados en un reactor UASB en regiones subtropicales. Buenos Aires Salta, Argentina: Universidad Nacional de Salta.
- Guerra, Á., Castro, L. M., & Tovar, A. (2013). Utilization of whey as a source of nutritional energy to minimize the problem of environmental pollution. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (66), 258-269.
- Gunnerson, C., & Stuckey, D. (2007). Anaerobic digestion: principles and practices for biogas systems. World Bank technical paper.
- Hafner, S., Astals, S., Buffiere, P., Lojborg, N., Holliger, C., Koch, K., & Weinrich, S. (2020). Calculation of methane production from manometric measurements. Standard BMP methods document. Obtenido de <Https://Www.Dbfz.de/En/BMP>
- Hartung, J., & Phillips, V. R. (2009). Control of Gaseous Emissions from Livestock Buildings and Manure Stores. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57(3), 173–189. doi:<https://doi.org/10.1006/JAER.1994.1017>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., ... & Plugge, C. M. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522.
- Hublin, A., & Zelić, B. (2013). Modelling of the whey and cow manure co-digestion process. *Waste Management Research*, 31(4), 353–360. doi:<https://doi.org/10.1177/0734242X12455088>
- Huimin, Z., Junqiu, J., Qingliang, Z., Lili, L., & Kun, W. L. (2022). Effects of organic loading

- rates on high-solids anaerobic digestion of food waste in horizontal flow reactor: Methane production, stability and mechanism. *Chemosphere*, 293. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133650>
- I, A., M, A., D, B., L, B., JL, C., AJ, G., . . . P, J. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Sci Technol*, 59(5). doi:10.2166/wst.2009.040.
- Jensen, P. D., Ge, H., & Batstone, D. J. (2011). Assessing the role of biochemical methane potential tests in determining anaerobic degradability rate and extent. *Water Science and Technology*, 64(4), 880–886. doi:<https://doi.org/10.2166/WST.2011.662>
- Jewell, W. (1982). Dry anaerobic fermentation of agriculturas and high strength wastes. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, (12), 3-15.
- Kabeyi, M. J., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy*, 1–43. doi:<https://doi.org/10.1155/2022/8750221>
- Koch, K., Lippert, T., & Drewes, J. E. (2015). The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in biochemical methane potential (BMP) tests. *Bioresource Technology*, 243, 457-463.
- Lisak, K., & Tratnik, L. (2014). Possibilities of Whey Utilisation. *Mljekarstvo*, 64(3), 152-168.
- López, A. (2019). Producción de biogás en reactores a escala laboratorio a partir de la digestión anaerobia de una mezcla de lactosuero y estiércol de vaca. Repositorio de Tesis UNAM. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000798156>
- Machado, L. R., Ferrarez, A. H., Junior, J. L., & Alves, F. C. (2022). Biogas production and composition optimization in an anaerobic digestor using cheese whey and swine manure as substrate. *Acta Scientiarum. Technology*, 44. doi:<https://doi.org/10.4025/ACTASCITECHNOL.V44I1.56923>
- Madrigal Pérez, G. B. (2019). Influencia de la dilución sobre la digestión anaerobia de la Cachaza, residuo producido en la agroindustria panelera de Colombia. Repositorio Universidad Peruana Unión.
- Mamani Quiroz, V., & Sullca Flores, A. O. (2023). Evaluación del potencial de biometanización del lactosuero de diferentes plantas productoras de queso de la región Puno - Perú. Repertorio Universidad Peruana Unión.
- Mamani, V., & Sullca, A. (2023). Evaluación del potencial de biometanización del lactosuero

- de diferentes plantas productoras de queso de la región Puno - Perú. Repositorio UPEU. Obtenido de <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/6969>.
- Marañón, E., Castrillón, L., Quiroga, G., Fernández-Nava, Y., Gómez, L., & García, M. M. (2012). Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Bioresouce Technology*, 114, 296-302.
- María, P. B., Beily, E., & Crespo, D. (2021). Ensayo potencial bioquímico metanogénico Una metodología clave para conocer la energía de las biomasas.
- Martinez, J., Dabert, P., Barrington, S., & Burton, C. (2009). Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability. *Bioresouce Technology*, 100(22), 5527–5536.  
doi:<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.02.038>
- Marwaha, S. S., & Kennedy, J. F. (2007). Whey—pollution problem and potential utilization. *International Journal of Food Science and Technology*, 23(4), 323–336.  
doi:<https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1988.TB00586.X>
- McAllister, T. A., Newbold, C. J., & Rode, L. M. (2020). Rumen microbial ecology and physiology in relation to feed efficiency. *Journal of Animal Science*, 98, S1-S2.
- Menéndez Gutiérrez, C. L., & Pérez Olmo, J. M. (2003). Proceso para el tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales industriales. 306-33.
- Metcalf, & Eddy, I. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. McGraw-Hill, 5.
- Minitab, L. (2017). Minitab Statistical Software (versión 18).
- Montalvo Martínez, S. J. (2000). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Generalidades, 1-36.
- Moody, L., Burns, R., Wei, W., Spajić, R., Florijančić, T., & Lužaić, R. (2009). Use of Biochemical Methane Potential (BMP) assays for predicting and enhancing anaerobic digester performance.
- Morales, B., Zaiat, M., & Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888–903.
- Nabarlatz, D. A., Arenas Beltrán, L. P., Herrera Soracá, D. M., & Niño Bonilla, D. A. (2013). Biogas Production by Anaerobic Digestion of Wastewater from Palm Oil Mill Industry. *Ciencia Tecnologia y Futuro*, 5(2), 73–84.  
doi:<https://doi.org/10.29047/01225383.58>

- Nagar, S., & Nagal, S. (2013). Whey: Composition, Role in Human Health and its Utilization in Preparation of Value Added Products. International Journal of Food and Fermentation Technology, 3(2), 93. doi:<https://doi.org/10.5958/2277-9396.2014.00336.5>
- Nawel, N., Nabila, L., Doula, D., & Mostefa, B. (2018). Recovery of the sludge of a wastewater treatment plant by anaerobic digestion and biogas production. Proceedings of the 8th International Conference on Research in Engineering. Science and Technology. doi:<https://doi.org/10.33422/8REST.2018.11.55>
- Niemczewska, J. (2012). Characteristics of utilization of biogas technology. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 57(4), 178-182.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & López-Hernández, J. C. (2016). Tratamiento y aprovechamiento del lactosuero en países de América Latina. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32(1), 16.
- Orhorhoro, E. K., Ebunilo, P. O., & Sadjere, G. E. (2017). Experimental determination of effect of total solid (TS) and volatile solid (VS) on biogas yield. American Journal of Modern Energy, 3(6), 131–135. doi:<https://doi.org/10.11648/j.ajme.20170306.13>
- Orrantia, M., Meza Escalante, E., Burboa Charis, V., García Reyes, R., Atilano Camino, M., Serrano Palacios, D., Alvarez, L. (2023). Granular activated carbon enhances the anaerobic digestion of solid and liquid fractions of swine effluent at different mesophilic temperatures. Anaerobe. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2023.102782>
- Osorio González, C. S., Gómez Falcon, N., Brar, S. K., & Ramírez, A. A. (2022). Cheese Whey as a Potential Feedstock for Producing Renewable Biofuels: A Review. Energies, 15(18). doi:<https://doi.org/10.3390/EN15186828>
- Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., Marmolejo Rebellón, L. F., Torres López, W. A., Fuentes López, L., Ossa Arias, M., & Barba Ho, L. E. (2016). Evaluation of sewage sludge from municipal WWTP as inoculum in the anaerobic digestion of biowaste. Revista Ion, 29(1), 37–46. doi:<https://doi.org/10.18273/REVION.V29N1-2016003>
- Peralta, H. (2018). Recuperación de las proteínas del suero de leche utilizando quitosán. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio Institucional UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2018/noviembre/0781006/Index.html>
- Pérez, J. A., López, M., & Rodríguez, F. (2019). Gestión de residuos orgánicos en mataderos: impacto y soluciones. Revista de Ciencias Ambientales, 35(2), 45-54.
- Pilarska, A. A., Pilarski, K., Witaszek, K., Waliszewska, H., Zborowska, M., Waliszewska,

- B., . . . Szwarc-Rzepka, K. (2017). Treatment of dairy waste by anaerobic digestion with sewage sludge. *Waste Management*, 68, 704-708.
- Pimentel, J., Amante, A., Martínez, R., Rössel, E., García, E., & Gómez, A. (2019). Digestión anaerobia de estiércol de ovino para producir biogás y bioabono. *Agro Productividad*, 12(4). doi:<https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.120>
- Proceso de transformación de la biomasa en energía. (2004). Obtenido de [http://nti.educa.rcanaria.es/blas\\_cabrera/TER/BIOMA/BIOMA16](http://nti.educa.rcanaria.es/blas_cabrera/TER/BIOMA/BIOMA16)
- Proceso de transformación de la biomasa en energía. (2004, septiembre). NTI - Nuevas Tecnologías e Informática. Recuperado 15 de octubre de 2024, de [http://nti.educa.rcanaria.es/blas\\_cabrera/TER/BIOMA/BIOMA16](http://nti.educa.rcanaria.es/blas_cabrera/TER/BIOMA/BIOMA16)
- Quispe, L., & Huanca, K. (2022). Influencia de la relación inóculo-sustrato en el potencial bioquímico de metano del residuo lactosuero. *Repositorio UPEU*. Obtenido de <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/6010>
- Raposo, F., Banks, C. J., Siegert, I., Heaven, S., & Borja, R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*, 41(6), 1444–1450. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.01.012>
- Raposo, F., De la Rubia, M. A., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 861-877.
- Sayara, T., & Sánchez, A. (2019). A Review on Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Wastes: Pretreatments and Operational Conditions. *Applied Sciences*, 9(21). doi:<https://doi.org/10.3390/APP9214655>
- Speece, R. E. (2008). Anaerobic biotechnology and odor/corrosion control for municipalities and industries.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & Haan, C. D. (2006). Livestock's long shadow: environmental issues and options.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Eddy, M. (2020). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. McGraw-Hill, 5.
- Torres, J. L. (2018). Dulces de leche utilizando lactosuero. *Leches Concentradas Azucaradas. Tradición a La Ciencia*, 202–220. doi:<https://doi.org/10.35985/9789585522466.7>
- Ttito Ayte, N. J. (2023). EFECTO DE LA SOBREALIMENTACION EN LA PRODUCCION DE METANO EN ALPACAS (Vicugna pacos) MACHOS DE LA

RAZA HUACAYA EN EL CENTRO EXPERIMENTAL CICAS – LA RAYA. (Vol. 2). CUSCO.

- Verastegui, C. (2019). Producción de biogás por codigestión de estiércol de ganado bovino, lactosuero y cáscara de papaya. Repositorio Institucional Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14077/1924>
- Vivekanand, V., Mulat, D. G., Eijsink, V. G., & Horn, S. J. (2018). Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage. *Bioresouce Technology*, 249, 35–41. doi:<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.09.169>
- Yadav, J. S. (2015). Utilization of whey for the production of biofuels and value-added products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 762–777.
- Zambrano Díaz, M. (2016). Determinación del rendimiento de biogás a partir de mezclas entre estiércol vacuno y suero de quesería mediante digestión anaeróbica. Repositorio Institucional UNAM. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2711>.
- Zandonà, E., Blažić, M., & Režek Jambrak, A. (2021). Whey Utilization: Sustainable Uses and Environmental Approach. *Food Technology and Biotechnology*, 59(2), 147–161. doi:<https://doi.org/10.17113/10.17113/FTB.59.02.21.6968>
- Zhang, L., Li, Y., Liu, X., Ren, N., & Ding, J. (2019). Enhanced methane production from anaerobic digestion of agricultural waste using rumen microorganisms and sewage sludge as co-inoculum. (Elsevier, Ed.) *Renewable Energy*, 135, 572-580. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.047>
- Zhang, W., Kong, T., Xing, W., Li, R., & Yang, T. (2022). Links between carbon/nitrogen ratio, synergy and microbial characteristics of long-term semi-continuous anaerobic co-digestion of food waste, cattle manure and corn straw. *Bioresour Technol*, 343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126094>

## APENDICES

### Apéndice 1. Matriz de Consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis General	Variables	Metodología
• ¿Cuál es la producción de biogás a partir de lactosuero utilizando como inóculos microorganismos ruminantes y lodos de la PTAR de San Jerónimo	• Evaluar la producción de biogás a partir de lactosuero utilizando como inóculos microorganismos ruminantes y lodos de la PTAR de San Jerónimo	• La producción de biogás a partir de lactosuero se ve significativamente influenciada por el tipo de inóculo y por la relación inóculo-sustrato (RIS).	<b>Variables independientes</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación inóculo – sustrato (1, 0.4 y 0.7)</li> <li>• Tipo de inóculo (0%, 50% y 100%)</li> </ul> <b>Variables dependientes</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen de biogás</li> <li>• Volumen de metano</li> </ul>	<b>Tipo de investigación</b> De tipo aplicada con enfoque cuantitativo.
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>			<b>Diseño de investigación</b> Investigación experimental
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuál es la relación de carbono – nitrógeno del lactosuero?</li> <li>• ¿Cuál es el contenido de sólidos volátiles del sustrato (lactosuero) e inóculos (lodos de la PTAR, microorganismos ruminantes)?</li> <li>• ¿Cómo influye la relación inóculo-sustrato (RIS) y tipo de inóculo en la cantidad y calidad de biogás?</li> <li>• ¿Cuáles son los valores de la relación inóculo-sustrato (RIS) y el tipo de inóculo que logran mayor cantidad y calidad de biogás?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar la relación de carbono – nitrógeno del lactosuero</li> <li>• Establecer el contenido de sólidos volátiles del sustrato (lactosuero) e inóculos (lodos de la PTAR, microorganismos ruminantes)</li> <li>• Evaluar la influencia de la relación inóculo-sustrato (RIS) y del tipo de inóculo en la cantidad y calidad de biogás</li> <li>• Seleccionar los valores de la relación inóculo-sustrato (RIS) y el tipo de inóculo que logran mayor cantidad y calidad de biogás</li> </ul>			

## Apéndice 2.

### *Matriz de Operacionalización de variables*

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Indicador	Unidades	Instrumento de medición
<b>Relación Inóculo–Sustrato (RIS)</b>	Proporción entre la cantidad de inóculo (microorganismos activos) y el sustrato (material orgánico) que se utiliza para la producción de biogás.	Es la relación entre el volumen del inóculo y el volumen del sustrato utilizada en cada tratamiento experimental: 1, 0.4 y 0.7.	Valor de la relación inóculo – sustrato (RIS)	Adimensional (1, 0.4 y 0.7)	Balanza analítica
<b>Tipo de inóculo</b>	Tipo de fuente biológica que contiene microorganismos responsables de la degradación anaerobia (como lodo de PTAR, rumen, etc.).	Es la proporción entre lodos de PTAR y rumen utilizado como inóculo: 0% PTAR – 100% rumen (0g/20g), 50% PTAR – 50% rumen (10g/10g), 100% PTAR – 0% rumen (20g/0g).	Composición cualitativa del inóculo	Cualitativa nominal	Balanza analítica, vaso de precipitado.
<b>Volumen de biogás</b>	Cantidad total de gas generado (incluyendo metano y otros gases) por unidad de materia orgánica degradable en condiciones anaerobias.	Es el volumen de biogás generado durante la digestión anaerobia, medido en condiciones controladas de laboratorio.	Volumen total de biogás generado	cm <sup>3</sup>	Jeringa graduada.
<b>Volumen de metano</b>	Porcentaje de metano contenido en el biogás producido durante el proceso de digestión anaerobia.	Es el volumen específico de CH <sub>4</sub> dentro del biogás total generado, calculado mediante el análisis del contenido gaseoso.	Volumen específico de metano (CH <sub>4</sub> )	cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	Análisis manométrico

## ANEXO

### Anexo 1.

#### *Informe de Resultados del Análisis de Carbono y Nitrógeno en Lactosuero*

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
Av. de la Libertad 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224811 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú

 UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

**INFORME DE ANÁLISIS**  
Nº0183-25-LAQ

**SOLICITANTE :** LISET DELIA SULCARANI DIAZ  
DAYCELY HUANCA QUISPE

**MUESTRA :** LACTO SUERO

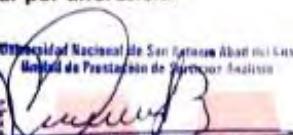
**FECHA :** C/23/06/2025

	Carbono %	Nitrógeno %
Lacto suero	3,09	0,11

Método Químico, Conversión en volátil , calcular por diferencia.

Método AOAC 984.13

Cusco, 14 de Julio 2025

  
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco  
Unidad de Prestación de Servicios Académicos  
Laboratorio de Análisis Químico  
Responsable: Herrera Arbelaez  
RESPONSABLE DEL LABORATORIO  
DE ANÁLISIS QUÍMICO

**UNAAC**