UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA: INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PROTOTIPO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE LA PLANTA DE FAENAMIENTO DE ANTONIO ANTE"

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías Renovables

Línea de investigación: Producción industrial y tecnológica sostenible

Autoras:

Melany Roxana Arias Navas, Jennifer Tatiana Narváez Arellano

Director:

PhD. Juan Carlos García Montoya

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	ARIAS NAVAS MELANY ROXANA

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PROTOTIPO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE LA PLANTA DE FAENAMIENTO DE ANTONIO ANTE
AUTOR (ES):	Melany Roxana Arias Navas Jennifer Tatiana Narváez Arellano
FECHA: DD/MM/AAAA	20/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES
DIRECTOR /ASESOR:	PhD. Juan Carlos García MSc.Juan Guamán

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 20 días del mes de Julio de 2026

EL AUTOR:

(Firma) Melany Roxana Arias Navas Time Stamping Security Data .....
Nombre: MELANY ROXANA ARIAS NAVAS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

2. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	NARVÁEZ ARELLANO JENNIFER TATIANA

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PROTOTIPO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE LA PLANTA DE FAENAMIENTO DE ANTONIO ANTE
AUTOR (ES):	Melany Roxana Arias Navas Jennifer Tatiana Narváez Arellano
FECHA: DD/MM/AAAA	20/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES
DIRECTOR /ASESOR:	PhD. Juan Carlos García MSc.Juan Guamán

3. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 20 días del mes de Julio de 2026

EL AUTOR:

(Firma)..

.....
Nombre: JENNIFER TATIANA NARVAEZ ARELLANO

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 20 de julio de 2026

PhD. Juan Carlos García Montoya

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

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



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN CARLOS GARCIA MONTOYA

(f) ……

PhD. Juan Carlos García Montoya

C.C. 1002279535

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del Trabajo de Integración Curricular "DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PROTOTIPO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE LA PLANTA DE FAENAMIENTO DE ANTONIO ANTE" elaborado por Melany Roxana Arias Navas & Jennifer Tatiana Narváez Arellano, previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías Renovables, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN CARLOS GARCIA MONTOYA

(f):…….

TUTOR: PhD. Juan Carlos García Montoya

C.C. 1002279535

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN FERNANDO GUAMAN TABANGO

(f):…….

ASESOR: MSc. Juan Fernando Guamán Tabango

C.C. 1002992244

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN CARLOS GARCIA MONTOYA

(f):…….

BIOMETRISTA PhD. Juan Carlos García Montoya

C.C. 1002279535

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo a Dios, quien me ha dado la sabiduría, paciencia y determinación necesaria para hacer este sueño realidad. Gracias por ser mi refugio en los días difíciles, mi guía en la confusión y la fuente de paz que ha sostenido mi mente y mi corazón.

A mis padres, *Juan Arias y Norma Navas*, con todo mi amor y admiración. Su esfuerzo, su apoyo incondicional y su ejemplo de vida han sido mi impulso más grande. A ti, **padre**, te agradezco de manera especial por cada palabra sabia, por tu ternura disfrazada de firmeza, y por enseñarme a avanzar con determinación. Sin duda, este logro también les pertenece, porque sin su dedicación, hoy no estaría aquí.

A mis tres **hermanas**, quienes con su alegría y apoyo me motivan a seguir creciendo. En cada una de ustedes veo un reflejo de la fuerza, la esperanza y el amor que me impulsan a ser una mejor persona cada día.

A **mi esposo**, compañero de vida, quien ha caminado a mi lado en este proceso con amor, paciencia y comprensión. Gracias por ser apoyo firme, por animarme a seguir adelante, y por recordarme siempre el valor de mis sueños.

A **mi hija, Irina**, que llegaste en el momento en que tenías que llegar, justo cuando el destino lo dispuso, y sin saberlo te convertiste en mi impulso, mi fuerza, mi motor. Gracias por darme la razón más hermosa para seguir adelante.

Melany Arias

Dedico este logro a Dios, porque incluso en los días donde el cansancio y la soledad pesaban más que mis fuerzas, él jamás dejó de sostenerme. Porque cada oración pronunciada en silencio, cada súplica, cada lágrima y las ganas de rendirme encontraron respuesta en su amor.

A mis padres, *Fernando Narváez y Carmen Arellano,* quienes han sido mi pilar, me enseñaron a caminar con dignidad, a levantarme después de cada caída y a nunca rendirme. Este logro lleva impregnado cada sacrificio silencioso, cada consejo y cada palabra de aliento que me sostuvo cuando sentía desfallecer. Todo lo que soy ahora lleva una parte de ustedes que sembraron en mí.

A **mi madrina**, quien me abrió las puertas de su hogar y de su corazón. Por su paciencia infinita, por su apoyo incondicional y por haber sido esa mano extendida en momentos donde más la necesité. Porque muchas veces, sin darse cuenta, se convirtió en esa madre y amiga que necesitaba.

A **mi mejor amigo,** que llegó en el momento indicado, por la lealtad sincera y por acompañarme incluso en los días donde ni yo sabía cómo seguir adelante. Porque hubo palabras que llegaron como refugio en medio del caos y porque su apoyo incondicional también forma parte de este sueño cumplido.

Jennifer Narváez

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al *PhD. Juan Carlos García*, por el tiempo que me dedicó, por su paciencia y por cada una de sus recomendaciones, que me ayudaron a mejorar y dar forma a este trabajo. Su acompañamiento enriqueció profundamente este proceso académico.

También agradezco al *MSc. Juan Guamán*, por su constante orientación, su apoyo y la confianza que depositó en mí desde el inicio. Su guía fue clave para la culminación exitosa de este trabajo.

Gracias infinitas a *Dios*, mi guía, mi fuerza y mi refugio. En cada momento de cansancio, duda o incertidumbre, sentí su presencia llenándome de paz y dándome el aliento necesario para continuar. Este logro no es solo mío, es testimonio de su amor fiel y de los planes que ha trazado para mi vida.

A mis padres, que han sido y serán siempre mi pilar más firme. Gracias por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y por estar siempre ahí, incluso cuando parecía que no podía más. A ti, *papá*, gracias por tus palabras sabias, por tu ejemplo de vida y por no soltarme nunca.

A mi esposo, mi compañero de vida, gracias por tu amor, paciencia y comprensión. Gracias por estar en silencio cuando lo necesitaba, por animarme con ternura, y por confiar en mí incluso en los momentos en que yo misma dudaba.

A mi hija, quien todavía no sabe leer, ni entiendes de palabras escritas, pero quiero que algún día sepas que mientras tú dormías a mi lado, yo escribía cada página con una sola mano y con el corazón lleno de ti.

Agradezco sinceramente a la empresa *SERMAA-EP*, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo en sus instalaciones. Su disposición y el acompañamiento técnico que me ofrecieron fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación, y significaron un gran aporte a mi formación tanto profesional como personal.

Finalmente, a cada persona que me regaló una palabra de aliento, un gesto amable o simplemente su compañía durante este proceso: gracias. Este logro no es solo académico, también es emocional y humano, y lo guardaré siempre en mi corazón con profunda gratitud.

Melany Arias

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento al *PhD. Juan Carlos García*, director de este trabajo de titulación, por su guía, confianza y acompañamiento a lo largo de este proceso. Su conocimiento y exigencia fueron fundamentales para culminar este proyecto de la mejor manera.

De igual manera, agradezco al *MSc. Juan Guamán*, asesor de este trabajo, por el tiempo brindado y por cada uno de sus aportes académicos, los cuales permitieron fortalecer y dar forma a este trabajo.

A *Dios*, por darme la fortaleza necesaria para continuar incluso en los momentos de mayor incertidumbre. Porque cuando el camino parecía pesado, encontré en Él la calma para seguir adelante y la esperanza para no rendirme. Cada paso de este proceso estuvo acompañado por su amor y su infinita misericordia.

A mis padres, por todo el esfuerzo que hicieron para verme llegar hasta aquí. Gracias por las noches de preocupación, por las palabras que me devolvían la confianza y por creer en mí aun cuando yo dudaba. Este logro también refleja cada sacrificio silencioso que hicieron por mi bienestar y mi futuro.

A mis hermanos, Eslendy, Alán, Kendra y Jade, gracias por llenar mis días de compañía, cariño y momentos que hicieron más ligero este camino. Sus ocurrencias, apoyo y presencia fueron un refugio en medio del cansancio y la presión.

A mi madrina, por recibirme con tanto cariño y hacerme sentir parte de su hogar. Gracias por cada gesto de cuidado, por la comprensión y por brindarme un espacio donde encontré tranquilidad y apoyo. *A sus hijos*, por su cercanía, por preocuparse por mí y por hacerme sentir acompañada durante esta etapa lejos de casa.

A la empresa *SERMAA-EP* que abrió sus puertas para el desarrollo de este trabajo, gracias por permitirme adquirir nuevos conocimientos y experiencias. Haber formado parte de este entorno representó una oportunidad valiosa para mi crecimiento profesional y personal.

A mis mejores amigos, gracias por convertirse en ese apoyo incondicional que muchas veces necesitaba sin siquiera pedirlo, por escucharme en los días difíciles, por las risas que aliviaban el estrés y por permanecer incluso en los momentos en los que todo parecía demasiado. Su amistad hizo que este proceso no se sintiera tan solitario.

Finalmente, agradezco a cada persona que estuvo presente de una u otra manera. A quienes me brindaron una palabra de ánimo, una oración, un consejo o simplemente su compañía. Cada gesto, por pequeño que pareciera, dejó una huella muy importante en mí.

Jennifer Narváez

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio surge ante la necesidad de aprovechar los residuos orgánicos generados en la Planta de Faenamiento de Antonio Ante (Imbabura, Ecuador), los cuales poseen un alto potencial energético desaprovechado. Se propone el diseño de un biodigestor prototipo para la generación de energía eléctrica y térmica, contribuyendo a una gestión ambientalmente sostenible en el sector agroindustrial. La metodología incluyó la caracterización fisicoquímica de los residuos (contenido ruminal, estiércol, sangre y lodos), la construcción de un biodigestor tipo batch de 8.05 L en acero inoxidable con control térmico (39.8±0.2°C) y monitoreo ESP32/Arduino, y la evaluación de dos mezclas con tres réplicas cada una. Los resultados mostraron que la Mezcla 1 (todos los residuos) produjo 2.606 L de biogás con 52% CH_4, mientras que la Mezcla 2 (solo ruminal y estiércol) produjo 2.566 L con 58% CH_4. Aunque la prueba t no mostró diferencias significativas ($p=0.206$), el tamaño del efecto fue grande (d de Cohen=1.51). La Mezcla 2 demostró mayor estabilidad (CV=1.9%) y calidad energética (PCI=5.78 kWh/m³), mientras que la Mezcla 1 presentó una correlación fuerte entre pH y producción ($r=0.851$), atribuida a la presencia de sangre y lodos. Desde la perspectiva de gestión integral de residuos, se selecciona la Mezcla 1 al permitir el aprovechamiento del 100% de los residuos generados. Mediante escalado teórico, se estimó una producción de 0.102 m³/día de biogás (0.158 kWh/día eléctricos, 0.237 kWh/día térmicos) para el total de residuos. Se concluye que la digestión anaerobia es técnicamente viable para la valorización energética de residuos de faenamiento, recomendándose una configuración híbrida CSTR+UASB para su implementación a escala real.

Palabras clave: biodigestor, residuos orgánicos, biogás, energía renovable, digestión anaerobia, cogeneración.

ABSTRACT

This study addresses the need to valorize the organic waste generated at the Antonio Ante Slaughterhouse Plant (Imbabura, Ecuador), which holds significant untapped energy potential. It proposes the design of a prototype biodigester for electrical and thermal energy generation, promoting environmentally sustainable management in the agro-industrial sector. The methodology included physicochemical characterization of waste (ruminal content, manure, blood, and sludge), construction of an 8.05 L stainless steel batch-type biodigester with thermal control (39.8±0.2°C) and ESP32/Arduino monitoring, and evaluation of two mixtures with three replicates each. Results showed that Mixture 1 (all waste) produced 2.606 L of biogas with 52% CH_4, while Mixture 2 (ruminal content and manure only) produced 2.566 L with 58% CH_4. Although the t-test showed no significant differences ($p=0.206$), Cohen's d effect size was large (1.51). Mixture 2 demonstrated greater stability (CV=1.9%) and energy quality (LHV=5.78 kWh/m³), while Mixture 1 showed a strong correlation between pH and production ($r=0.851$), attributed to the presence of blood and sludge. From an integrated waste management perspective, Mixture 1 was selected as it allows the utilization of 100% of the waste generated. Through theoretical scale-up, estimated biogas production for the total waste is 0.102 m³/day (0.158 kWh/day electricity, 0.237 kWh/day thermal energy). It is concluded that anaerobic digestion is technically viable for energy recovery from slaughterhouse waste, recommending a hybrid CSTR+UASB configuration for full-scale implementation.

Keywords: biodigester, organic waste, biogas, renewable energy, anaerobic digestion, cogeneration.

LISTA DE SIGLAS

MABIO. Matadero Bajo Inspección Oficial

ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

IPCC. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

HRT. Tiempo de Retención Hidráulica

ST. Sólidos Totales

SV. Sólidos Volátiles

IGM. Instituto Geográfico Militar del Ecuador

OSP. Laboratorio de Oferta de Servicios y Productos

PCI. Poder Calorífico Inferior

CR. Contenido Ruminal

E. Estiércol

S. Sangre

PTAR. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

MCDA. Análisis de Decisión por Criterios Múltiples

DCA. Diseño Completamente Aleatorizado

C/N. Relación Carbono-Nitrógeno

CSTR. Reactor Continuo de Tanque Agitado

AnSBR. Reactor Batch Secuencial Anaerobio

BMPCC. Coeficiente de Corrección del Potencial Bioquímico de Metano

DQO. Demanda Química de Oxígeno

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO 9
CAPÍTULO I 1
INTRODUCCIÓN 1
1.1 Problema de Investigación 1
1.2 Justificación 3
1.3 Objetivos 4
1.3.1 Objetivo General *4*
1.3.2 Objetivos Específicos *4*
1.4 Pregunta de Investigación 4
1.5 Hipótesis 4
1.5.1 Hipótesis Alternativa (Ha) *4*
1.5.2 Hipótesis Nula (Ho) *4*
CAPÍTULO II 5
MARCO TEÓRICO 5
2.1 Biomasa 5
2.1 Biogás 5
2.2 Fases del Proceso de Digestión Anaeróbica 6
2.3 Tipos de biodigestores 7
2.3.1 Biodigestores Continuos *7*
2.3.2 Biodigestores discontinuos *8*
2.4 Parámetros de control 9
2.4.1 Tiempo de retención Hidráulica (TRH) *9*
2.4.2 Tiempo de retención Celular (TRC) *10*
2.4.3 Relación Carbono/Nitrógeno *10*
2.4.4 Temperatura *11*
2.4.5 Sólidos volátiles y pH *11*
2.4.6 Sólidos totales (ST) *12*
2.4.7 Agitación *12*
2.5 Poder calorífico del biogás 13
2.6 Aplicación del biogás 13
2.6.1 Combustión directa *13*
2.6.2 Generación eléctrica *14*
CAPÍTULO III 15
MATERIALES Y MÉTODOS 15

3.1 Área de Estudio 15
3.2 Métodos 16
3.2.1 Caracterización de la biomasa residual de la planta de faenamiento 16
3.2.2 Construcción de un biodigestor a escala laboratorio con parámetros de control 18
3.2.3 Diseño experimental 27
3.2.4 Análisis estadístico 27
3.2.5 Preparación de mezclas 29
3.2.6 Evaluación del rendimiento de biogás para la generación eléctrica y térmica a partir de las mezclas del sustrato residual 30
3.3 Materiales, equipos y software 35
CAPÍTULO IV 36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 36
4.1 Caracterización de la biomasa residual por tipo de la planta de faenamiento 36
4.1.1 Contenido de Humedad 36
4.1.2 Sólidos Totales 37
4.1.3 Análisis elemental 37
4.2 Caracterización de las mezclas de biomasa residual de la planta de faenamiento 38
4.2.1 Contenido de Humedad y Sólidos Totales 38
4.2.2 Sólidos Volátiles de las Mezclas 41
4.2.3 Relación Carbono-Nitrógeno de Mezclas de Sustrato 42
4.2.3 Discusión sobre la naturaleza y el comportamiento de los residuos 44
4.3 Construcción de un biodigestor a escala laboratorio con parámetros de control 46
4.3.1. Cálculos para diseño del Biodigestor 46
4.3.2 Diseño Eléctrico y Sistema de Control del Biodigestor 47
4.3.3. Proceso de Manufactura del Biodigestor Prototipo 49
4.4 Sistema de monitoreo en tiempo real mediante aplicación móvil 52
4.4.1 Funcionalidades de la aplicación 53
4.4.2 Instalación del biodigestor en el laboratorio de energías renovables 54
4.5 Preparación de mezclas 54
4.5.1 Preparación y homogenización de las mezclas 54
4.5.2 Composición de las mezclas experimentales 55
4.5.3 Carga del biodigestor y condiciones iniciales de operación 56
4.6 Evaluación del rendimiento de biogás para generación eléctrica y térmica 58
4.6.1 Variables de análisis de producción de biogás 58

4.6.2 Análisis estadístico de la producción de biogás *60*
4.6.3 Correlación entre temperatura, pH y producción de biogás *63*
4.6.4 Comportamiento temporal de la producción de biogás *66*
4.6.5 Incidencia de la temperatura y el pH sobre la producción de biogás *67*
4.6.6 Producción total de biogás *71*
4.6.7 Composición del biogás obtenido *71*
4.6.8 Potencial energético del biogás (Mezcla 1) *72*
4.6.9 Escalado teórico y dimensionamiento de un biodigestor a escala real *73*
4.6.10 Modelado dinámico de la producción de biogás *78*
CAPÍTULO V 89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 89
5.1 Conclusiones 89
5.2 Recomendaciones 91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93
ANEXOS 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rangos óptimos de parámetros fundamentales para la digestión anaerobia.....18
Tabla 2 Matriz de alternativas de biodigestores.....19
Tabla 3 Materiales, cantidades y especificaciones técnicas utilizadas para la construcción del biodigestor prototipo.....24
Tabla 4 Mezcla de sustratos.....27
Tabla 5 Variables independientes y dependientes consideradas en el análisis estadístico. 29
Tabla 6 Recursos utilizados en las diferentes etapas del proyecto. 35
Tabla 7 Promedio de humedad de los residuos en porcentaje 36
Tabla 8 Porcentaje de Sólidos Totales de los residuos 37
Tabla 9 Resultados promedio del análisis elemental 37
Tabla 10 Composición porcentual de las mezclas preparadas.....38
Tabla 11 Resultados de humedad y sólidos totales de las mezclas.....39
Tabla 12 Resultados de sólidos volátiles (SV) de la mezcla utilizada.....41
Tabla 13 Determinación de la relación C:N de la mezcla 1.....42
Tabla 14 Determinación de la relación C:N de la mezcla 2.....43
Tabla 15 Matriz de criterio múltiple 47
Tabla 16 Componentes y características del diseño eléctrico y sistema de control.....48
Tabla 17 Proporción de mezcla y agua utilizada según relación 1:1 55
Tabla 18 Composición cualitativa de las mezclas experimentales evaluadas 55
Tabla 19 Condiciones iniciales de operación.....57
Tabla 20 Variables en la producción de biogás de la mezcla 1 59
Tabla 21 Variables en la producción de biogás de la mezcla 2 59
Tabla 22 Resultado de estadística descriptiva por mezcla.....60
Tabla 23 Coeficientes de correlación de Pearson entre variables operativas y producción de biogás. 64
Tabla 24 Volumen total de biogás producido por mezcla 71
Tabla 25 Composición porcentual promedio del biogás.....72
Tabla 26 Energía térmica y eléctrica estimada por mezcla.....72
Tabla 27 Estimación de producción de biogás y energía a escala real 74
Tabla 28 Configuración batch recomendada 75
Tabla 29 Tecnologías de biodigestión recomendadas para plantas de faenamiento.....76
Tabla 30 Producción de biogás y energía a escala real (BMPCC = 0.85) 77

Tabla 31 Resumen de Best Fit (%) obtenidos para los modelos de función de transferencia 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases del proceso de digestión anaeróbica 7
Figura 2 Biodigestor de flujo continuo tipo chino 8
Figura 3 Biodigestor tipo Batch 9
Figura 4 Tasas de crecimiento de bacteria de acuerdo a la variación de temperatura 11
Figura 5 Mapa de ubicación de la Planta de Faenamiento de Antonio Ante 15
Figura 6 Puntos de acumulación y porcentaje de residuos generados en la planta 16
Figura 7 Diagrama de Conexión del Sistema de Monitoreo 23
Figura 8 Pesaje y preparación de mezclas para determinación de humedad y sólidos totales 39
Figura 9 Curva de secado de la mezcla 1 40
Figura 10 Curva de secado de la mezcla 2 40
Figura 11 Preparación de mezclas para evaluación de sólidos volátiles 42
Figura 12 Preparación de mezclas para análisis elemental 43
Figura 13 Rolado de lámina metálica 50
Figura 14 Fondo cónico para purga 50
Figura 15 Placa plana acoplada mediante una brida empernada 51
Figura 16 Estructura metálica de soporte 52
Figura 17 Sistema eléctrico para monitoreo y control 52
Figura 18 Captura de pantalla de la aplicación mostrando las variables controlables en tiempo real 53
Figura 19 Ubicación del biodigestor en el laboratorio 54
Figura 20 Prueba de normalidad de la mezcla 1 61
Figura 21 Prueba de normalidad de la mezcla 2 61
Figura 22 Diagrama de cajas y bigotes para la comparación de volúmenes de biogás 62
Figura 23 Correlación pH vs rendimiento Mezcla 1 65
Figura 24 Correlación pH vs rendimiento Mezcla 2 65
Figura 25 Evolución de la presión máxima diaria 66
Figura 26 Comportamiento de la temperatura durante el TRH 68
Figura 27 Producción diaria promedio de biogás 69
Figura 28 Producción acumulada promedio de biogás 70
Figura 29 Ajuste del modelo de Gompertz de producción y tasa diaria para las Mezclas 1 y 2 79
Figura 30 Producción acumulada de biogás en volumen (L) 80

Figura 31 Evolución del pH promedio ± de las 3 réplicas.....81
Figura 32 Composición de sustratos por mezcla 82
Figura 33 Validación del modelo de función de transferencia para la Réplica 1 de la Mezcla 1.....83
Figura 34 Validación del modelo de función de transferencia para la Réplica 2 de la Mezcla 1.....84
Figura 35 Validación del modelo de función de transferencia para la Réplica 3 de la Mezcla 1.....85
Figura 36 Validación del modelo de función de transferencia de tercer orden para la Réplica 1 de la Mezcla 2 86
Figura 37 Validación del modelo de función de transferencia de tercer orden para la Réplica 2 de la Mezcla 2 87
Figura 38 Validación del modelo de función de transferencia de primer orden para la Réplica 3 de la Mezcla 2 88

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En esta sección se detallan la problemática, la justificación de la investigación y sus objetivos. Asimismo, se presentan las preguntas de investigación e hipótesis que constituyen el eje central de la investigación.

1.1 Problema de Investigación

Actualmente se generan alrededor de 11.2 mil millones de toneladas de residuos sólidos a nivel mundial cada año, y se proyecta que esta cifra podría incrementarse hasta alcanzar los 19 mil millones de toneladas anuales para el año 2025 (Naciones Unidas, 2023). Se proyecta que la población mundial alcanzará los 9.9 mil millones para el año 2050, lo que representa un incremento del 26.9% respecto a la población actual y a su vez un aumento del 70% de los residuos sólidos urbanos; cerca del 33% no recibe un tratamiento adecuado, una situación común en muchos países en desarrollo (UNEP, 2024).

Entre las actividades que más contribuyen a la generación de residuos se encuentra el sector de faenamiento, cuyo crecimiento ha sido progresivo (Nuñez-Pin & Lino-García, 2024).Y, en consecuencia, la contaminación que produce en el aire y en el agua por los procesos industriales propios de la faena, el tratamiento de subproductos y la inadecuada gestión de efluentes líquidos (Cho et al., 2020). Por esta razón es necesaria la administración sostenible de residuos y las estrategias para prevenir y minimizar su generación y se han transformado en prioridades políticas esenciales, siendo elementos clave en los esfuerzos conjuntos para disminuir la contaminación y contrarrestar el cambio climático global (Domínguez et al., 2019).

En Ecuador, se generan aproximadamente 5.3 millones de toneladas métricas de residuos al año, lo que hace indispensable una gestión integral y planificada de estos residuos orgánicos para potenciar la producción de biogás en el país (GRECI, 2024). Con el objetivo de mejorar la calidad de vida resulta fundamental optimizar los procesos de conversión energética. En las últimas décadas, debido a la creciente demanda de la población, la producción de biogás ha experimentado un crecimiento significativo donde su uso es similar al de otros gases convencionales, pero con la ventaja de contar con una fuente renovable de materia prima y a su vez, generar beneficios económicos sostenibles (Cajamarca et al., 2023).

Existen alrededor de 935 centros de faenamiento en funcionamiento en el país, de los cuales 87 son industriales, 311 artesanales y 398 tienes su habilitación con certificado Matadero Bajo Inspección Oficial (MABIO) (Agrocalidad, 2024). En la provincia de Imbabura hay 17 plantas de faenamiento, como la empresa pública de Faenamiento SERMAA-EP ubicada en el cantón Antonio Ante donde se faena especies bovinas y porcinas que generan residuos orgánicos con potencial energético (Agrocalidad, 2021).

De acuerdo al Código Orgánico del Ambiente (COA) la gestión integral de residuos y desechos en el Ecuador debe regirse por normas y procedimientos que prioricen la prevención, minimización, aprovechamiento y la disposición final; dicha gestión está bajo tutela del Estado y debe alinearse al Sistema Único de Manejo Ambiental (SUIA) (Ministerio del Ambiente y Agua, 2020). Aunque los GADs tienen la obligación legal de manejar estos residuos, muchas veces no cuentan con la capacidad técnica o logística. Esto evidencia la necesidad de implementar soluciones como biodigestores que permitan un aprovechamiento energético de los desechos generados (Argüello & Cando, 2019). Toda materia orgánica de origen animal o vegetal, como residuos y desechos orgánicos, es considerada biomasa, que puede ser aprovechada energéticamente (Sharma et al., 2025).

1.2 Justificación

La importancia de este proyecto radica en su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 12 y 13. En el marco del ODS 7, promueve el acceso a energía asequible y no contaminante, fortaleciendo la sostenibilidad energética mediante alternativas renovables que disminuyen la dependencia de fuentes fósiles. Relacionado con el ODS 12, fomenta la gestión responsable de los residuos orgánicos, evitando la contaminación ambiental y favoreciendo la transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles. Asimismo, responde a los compromisos del ODS 13, al contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y apoyar acciones de mitigación frente al cambio climático.

En concordancia con estos objetivos, la Constitución de la República del Ecuador reconoce en su artículo 14 el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, y en su artículo 15 establece el compromiso estatal de fomentar el uso de energías limpias y tecnologías ambientalmente sostenibles. Esto respalda iniciativas que promuevan el aprovechamiento de residuos para la generación de energía renovable, impulsando el desarrollo sostenible.

Dentro del marco jurídico nacional, la Ley Orgánica de Eficiencia Energética busca promover el uso racional y eficiente de la energía en todos los sectores, incentivando proyectos que transformen residuos en energía aprovechable. También, el Código Orgánico del Ambiente establece la responsabilidad de los generadores de residuos de gestionar adecuadamente sus desechos, incentivando su tratamiento y aprovechamiento energético para reducir impactos ambientales negativos.

A nivel local, la Ordenanza Municipal de Antonio Ante sobre Gestión de Residuos establece regulaciones específicas para el manejo responsable de residuos sólidos, incluidos los residuos orgánicos provenientes de actividades industriales como la faena animal. Sin

embargo, actualmente no existen sistemas de valorización energética implementados en la planta de faenamiento del cantón, lo que evidencia la necesidad de desarrollar soluciones innovadoras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un biodigestor prototipo para generación de energía eléctrica y térmica de la Planta de Faenamiento de Antonio Ante.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la biomasa residual de la planta de faenamiento.
- Construir un biodigestor a escala de laboratorio con parámetros de control.
- Evaluar el rendimiento de biogás para la generación eléctrica y térmica a partir de mezclas determinadas del sustrato residual.

1.4 Pregunta de Investigación

¿Cómo se puede potenciar los residuos orgánicos generados por la Planta de Faenamiento de Antonio Ante para la producción de energía eléctrica y térmica?

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis Alternativa (Ha)

Existen diferencias significativas en el rendimiento de biogás producido a partir de las dos mezclas de residuos generadas en la planta de faenamiento.

1.5.2 Hipótesis Nula (Ho)

No existen diferencias significativas en el rendimiento de biogás producido a partir de las dos mezclas de residuos generadas en la planta de faenamiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos y conceptuales del proyecto. Se abordan los principios de la biodigestión anaerobia, la generación de energía a partir del biogás y los elementos técnicos que permiten comprender el diseño del sistema propuesto.

2.1 Biomasa

La biomasa animal, como el estiércol, representa una materia prima valiosa para la producción de energía eléctrica y biofertilizantes. Por ello, su tratamiento previo se plantea como una alternativa viable contribuyendo no solo a la sostenibilidad ambiental, sino que también permite reducir los costos energéticos (Guares et al., 2021). La caracterización de residuos es un proceso fundamental para el diseño de reactores anaeróbicos, ya que permite definir el tipo de biodigestor según la concentración de sólidos totales y estimar la producción de biogás mediante parámetros energéticos y ambientales (Arango-Osorio et al., 2019).

En este contexto, la biodigestión anaeróbica emerge como una solución sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos. Este proceso biológico convierte la materia orgánica en biogás, biocombustible que puede ser aprovechado como combustible para vehículos, producción de calor y generación de energía eléctrica (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019).

2.1 Biogás

El biogás es un tipo de combustible renovable en forma gaseosa que se genera mediante la digestión anaerobia de la biomasa, es decir, a través de un proceso biológico que ocurre sin la presencia de oxígeno. Su composición está dominada principalmente por metano (55–65%)

y dióxido de carbono (35–45%), mientras que en menores proporciones contiene nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y pequeñas trazas de sulfuro de hidrógeno (Angel Cuapio et al., 2016) .

2.2 Fases del Proceso de Digestión Anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica es un proceso complejo que consta de 3 fases (Figura 1).

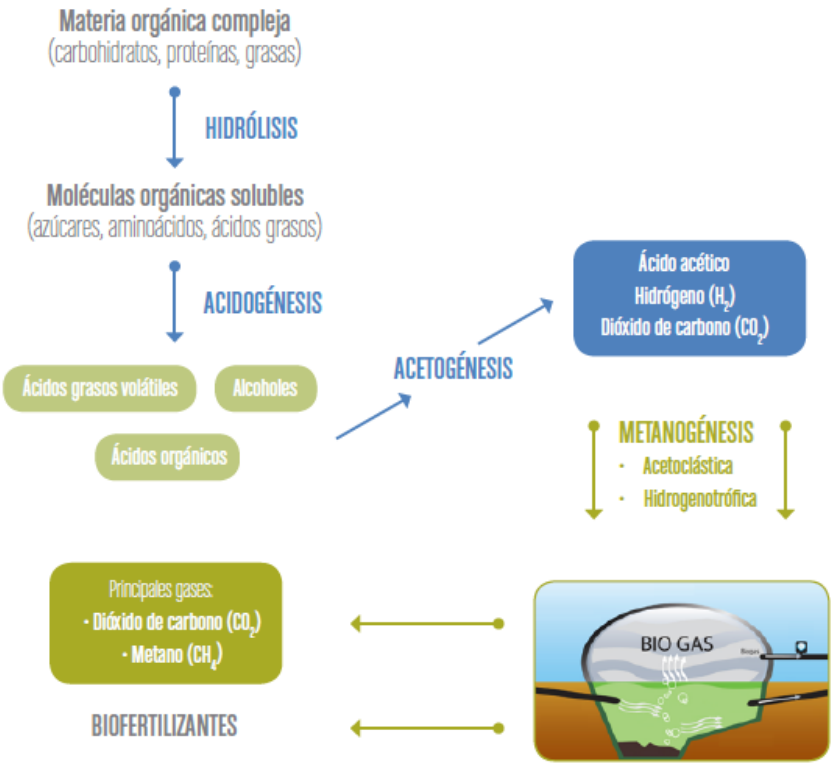
Hidrólisis, en esta primera etapa, las bacterias hidrolíticas actúan sobre la materia orgánica inicial, descomponiendo sus largas cadenas de compuestos carbonados en estructuras más cortas y simples. A lo largo de este proceso se liberan hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), preparando el material para las fases siguientes de la digestión anaerobia (Castillo Zhispón, 2022).

Acidificación, en esta fase, las bacterias acidogénicas y acetogénicas continúan la degradación del material resultante de la hidrólisis, transformando los compuestos orgánicos simples en ácidos grasos volátiles, principalmente ácido acético (CH_3COOH), además de metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso genera los precursores necesarios para la producción de biogás (Arce Cabrera, 2011).

Metanogénica, finalmente, los microorganismos anaerobios estrictos, pertenecientes al grupo de las arqueobacterias, convierten los productos intermedios —principalmente el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono— en metano (CH_4). Esta fase representa la etapa clave de la digestión anaerobia, ya que determina la producción final de biogás y su contenido energético (Asís et al., 2006).

Figura 1

Fases del proceso de digestión anaeróbica



Nota. Imagen obtenida de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2019)

2.3 Tipos de biodigestores

La implementación de biodigestores no solo reduce el volumen de residuos destinados a vertederos, sino que también mitiga la emisión de metano, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el dióxido de carbono (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Los biodigestores tienen distintos diseños y configuraciones, según su funcionamiento se clasifican en dos grandes grupos:

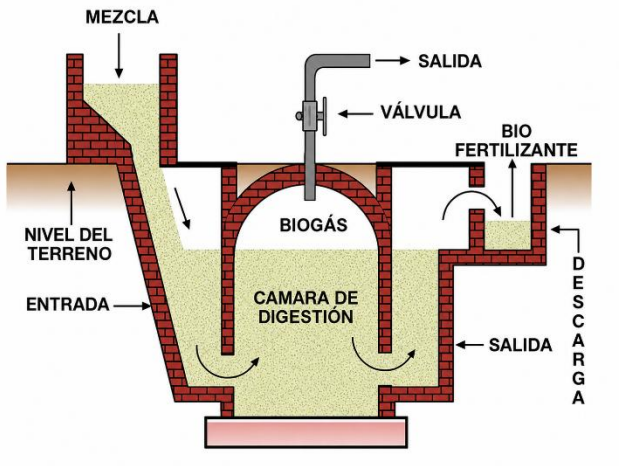
2.3.1 Biodigestores Continuos

Operan mediante la alimentación constante de sustrato orgánico, lo que permite mantener una producción estable de biogás. En este sistema, la entrada de material fresco y la

salida del efluente digerido ocurren simultáneamente, garantizando que el proceso no se interrumpa. Sin embargo, si la alimentación se detiene, también cesa la generación de biogás, ya que las bacterias responsables del proceso anaerobio dependen del flujo continuo de materia orgánica. Este tipo de biodigestores se utiliza principalmente en instalaciones de gran escala o sistemas productivos donde se requiere una producción sostenida de energía. Entre los modelos más comunes de biodigestores continuos se destacan el Indiano, el Chino y el Canadiense, ampliamente estudiados y aplicados por su eficiencia en la generación constante de biogás (Figura 2) (Armijo Hidalgo & Vera Sanchez, 2024; Baute Espíndola, 2018).

Figura 2

Biodigestor de flujo continuo tipo chino



Nota. Imagen obtenida de Joel & Cardozo (2019)

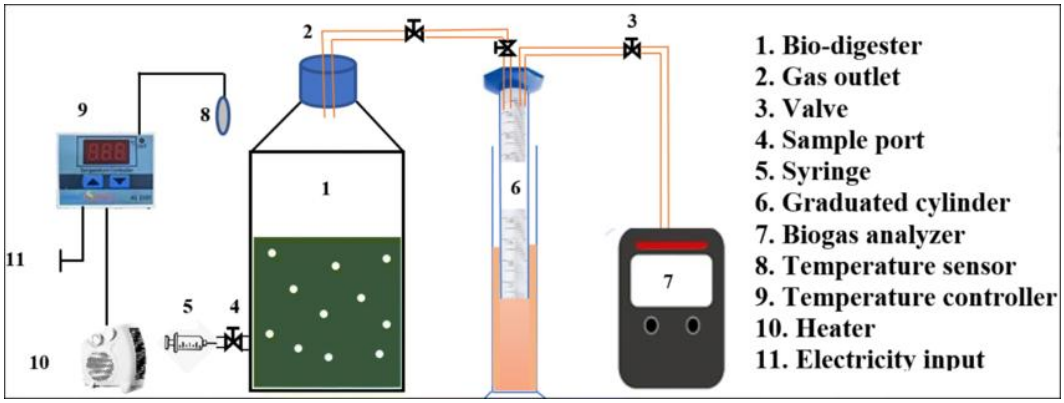
2.3.2 Biodigestores discontinuos

También conocidos como tipo “batch” (Figura 3), el proceso se lleva a cabo introduciendo una única carga de sustrato orgánico en el interior del reactor, el cual se mantiene completamente cerrado y sin presencia de oxígeno para permitir la fermentación anaerobia. Durante el proceso, el biogás se acumula dentro del mismo biodigestor o en un gasómetro acoplado externamente, dependiendo del diseño del sistema. Una vez finalizada la generación

de biogás, el reactor se abre para realizar la limpieza y extracción del biofertilizante resultante, dejando el sistema listo para una nueva carga. Este tipo de biodigestor es especialmente útil en proyectos experimentales o de pequeña escala, donde se requiere un control preciso de las variables del proceso y una operación por ciclos definidos (Armijo Hidalgo & Vera Sanchez, 2024; Baute Espíndola, 2018).

Figura 3

Biodigestor tipo Batch



Nota. Imagen obtenida de Morales Ibarra et al. (2020)

2.4 Parámetros de control

Para la construcción eficiente de un digestor anaerobio, es crucial considerar parámetros operativos como el tiempo de retención hidráulica (TRH), la carga orgánica, el contenido de sólidos totales (ST), la temperatura, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) (Wang et al., 2014) la tasa de carga orgánica (OLR) y la velocidad de agitación (Zhai et al., 2015).

2.4.1 Tiempo de retención Hidráulica (TRH)

Según el estudio, un TRH de 15–30 días es común en digestores mesofílicos, mientras que, en condiciones termofílicas, el rendimiento mejora notablemente, alcanzando un 95% del metano teórico en tan solo 11 días, en comparación con 27 días en mesofílicos (Guares et al., 2021; Meegoda et al., 2018).

2.4.2 Tiempo de retención Celular (TRC)

El tiempo de retención celular (TRC), también denominado tiempo de retención biológica, es un parámetro crítico en el diseño y la operación de digestores anaerobios, ya que define el tiempo promedio durante el cual los microorganismos permanecen dentro del reactor. A diferencia del tiempo de retención hidráulica (TRH), que se refiere al tiempo de permanencia del sustrato, el TRC se relaciona específicamente con la edad de la biomasa microbiana. En sistemas de digestión anaerobia, el TRC para microorganismos metanogénicos debe mantenerse entre 10 y 20 días en condiciones mesofílicas (Espinosa González, 2014).

2.4.3 Relación Carbono/Nitrógeno

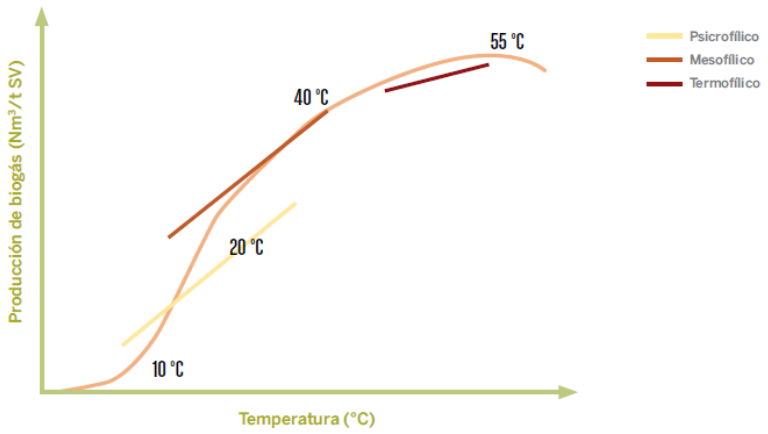
La relación carbono-nitrógeno (C/N) es un factor fundamental en el proceso de digestión anaerobia, ya que ambos elementos son esenciales para la nutrición de las bacterias metanogénicas. El carbono actúa como fuente principal de energía, mientras que el nitrógeno se emplea para la síntesis y crecimiento de nuevas células microbianas. Estas bacterias requieren aproximadamente 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la proporción ideal entre ambos elementos se sitúa generalmente entre 20:1 y 30:1. Cuando el sustrato presenta una relación C/N superior a 35:1, la degradación de la materia orgánica se vuelve más lenta debido a la deficiencia de nitrógeno, lo que limita la reproducción bacteriana; sin embargo, el proceso de generación de biogás puede extenderse por un tiempo mayor. Por el contrario, si la relación C/N es demasiado baja (menor a 8:1), se produce un exceso de amonio (NH_4^+), el cual en concentraciones elevadas puede resultar tóxico para los microorganismos y detener el proceso de digestión anaerobia (Urbina, 2024).

2.4.4 Temperatura

Otro de los parámetros más relevantes es la temperatura. Existe el rango de operación mesófilo (30°C a 40°C), el más utilizado por ofrecer un equilibrio entre eficiencia y costos de calefacción; y el termófilo (50°C a 60°C), que genera más metano, pero requiere condiciones más estrictas debido a la limitada diversidad bacteriana (Figura 4). Una vez alcanzada la temperatura de operación, es fundamental mantenerla estable, evitando variaciones mayores a ±5 °C (Lansing et al., 2008; Van Haren & Fleming, 2005).

Figura 4

Tasas de crecimiento de bacteria de acuerdo a la variación de temperatura



Nota. Imagen obtenida de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2019) .

2.4.5 Sólidos volátiles y pH

La tasa de carga se refiere a la cantidad de sólidos volátiles añadidos por unidad de volumen del digestor por día, y varía entre 1.2 y 4.0 kg VS/m³/d, dependiendo del tipo de digestor y del sustrato utilizado. Otro aspecto clave es el control de la alcalinidad y el pH dentro del digestor que incide en el desempeño de las bacterias metanogénicas, por lo que debe mantenerse en un rango óptimo de 6.8 a 7.2, ya que estas bacterias son sensibles a variaciones

fuera de estos límites. Aunque otras especies bacterianas pueden tolerar rangos de pH más amplios, mantener este intervalo es esencial para maximizar la producción estable de biogás (Nuhu et al., 2021).

2.4.6 Sólidos totales (ST)

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2019) los sólidos totales corresponden a todo el material que queda después de calentar una muestra fresca en una estufa a 105.5°C durante un tiempo determinado, eliminando por completo su contenido de agua. Aunque la biodigestión es un proceso biológico llevado a cabo por distintos microorganismos, este puede realizarse en ambientes muy variados. Según el porcentaje de ST presente en el sustrato, las tecnologías y los procesos de biodigestión se clasifican en tres grandes categorías:

Biodigestión húmeda. Se lleva a cabo en un medio líquido donde los sólidos representan entre el 1% y el 15–17 %.

Biodigestión líquida. Se aplica a tecnologías diseñadas para tratar grandes volúmenes de efluentes totalmente líquidos, con contenidos de sólidos menores al 1%.

Biodigestión seca o semiseca. Utiliza tecnologías capaces de procesar residuos con contenidos de MS superiores al 20%.

2.4.7 Agitación

La agitación dentro del digestor es un parámetro físico clave que influye notablemente en la eficiencia de la producción de biogás, ya que facilita el contacto entre bacterias y sustratos, libera burbujas atrapadas y evita la formación de capas no deseadas. Existen tres tipos principales de tecnologías de mezcla: mecánica, hidráulica y neumática, siendo la mecánica la

más utilizada (Adnane et al., 2024). La eficiencia de la agitación depende de factores como la velocidad, el modo de mezcla y las propiedades del sustrato. No obstante, una alta intensidad de agitación puede dañar la estructura bacteriana y disminuir la producción de biogás. Durante la fase inicial del reactor, una mayor agitación es beneficiosa, pero debe reducirse al alcanzar la metanogénesis (Singh et al., 2019).

2.5 Poder calorífico del biogás

El poder calorífico es la cantidad de energía liberada por unidad de volumen o masa de combustible cuando se quema completamente. En el caso del biogás, esta propiedad está directamente relacionada con su concentración de metano, el cual es el principal componente energético de la mezcla. Existen dos formas de expresar esta propiedad: el poder calorífico superior (PCS o HHV), que incluye el calor de condensación del vapor de agua generado en la combustión; y el poder calorífico inferior (PCI o LHV), que excluye este calor. Para aplicaciones prácticas de generación eléctrica y térmica, el PCI es el parámetro relevante, ya que representa la cantidad de calor efectivamente disponible en motores de combustión interna y turbinas(Piskier, 2017).

2.6 Aplicación del biogás

2.6.1 Combustión directa

La combustión directa del biogás consiste en oxidar su fracción combustible para generar calor aprovechable en diversos procesos térmicos. Durante la combustión, la energía química del metano se transforma en calor y se producen principalmente dióxido de carbono y vapor de agua, además de pequeñas cantidades de compuestos secundarios como monóxido de carbono o partículas derivadas de impurezas presentes en el biogás. Su aplicación es ampliamente utilizada en sistemas rurales e industriales por su simplicidad, eficiencia y bajo

costo operativo, especialmente cuando se requiere una fuente continua de calor (Carrasco García, 2008).

2.6.2 Generación eléctrica

La generación eléctrica a partir del biogás se basa en aprovechar su poder energético para accionar motores o microturbinas que transforman la energía química del metano en energía mecánica y, posteriormente, en electricidad. Durante el proceso, el biogás se quema en cámaras internas para mover pistones o turbinas, produciendo electricidad continua que puede ser utilizada en la propia instalación o inyectada a una red (Reyes Aguilera, 2017).

Es fundamental seleccionar la tecnología de conversión energética adecuada. Dentro de las alternativas disponibles, las turbinas de gas funcionan como motores de combustión interna con acción rotativa, sin embargo, debido a que requieren potencias superiores a 800 kW, resultan poco viables para pequeñas plantas. Por otro lado, las microturbinas, basadas en el mismo principio, ofrecen una opción más adecuada, ya que integran intercambiadores de calor para mejorar su eficiencia, operan a altas velocidades con bajo mantenimiento, y permiten aprovechar el calor residual para aplicaciones térmicas, alcanzando eficiencias térmicas de hasta 45% (Van Haren & Fleming, 2005).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

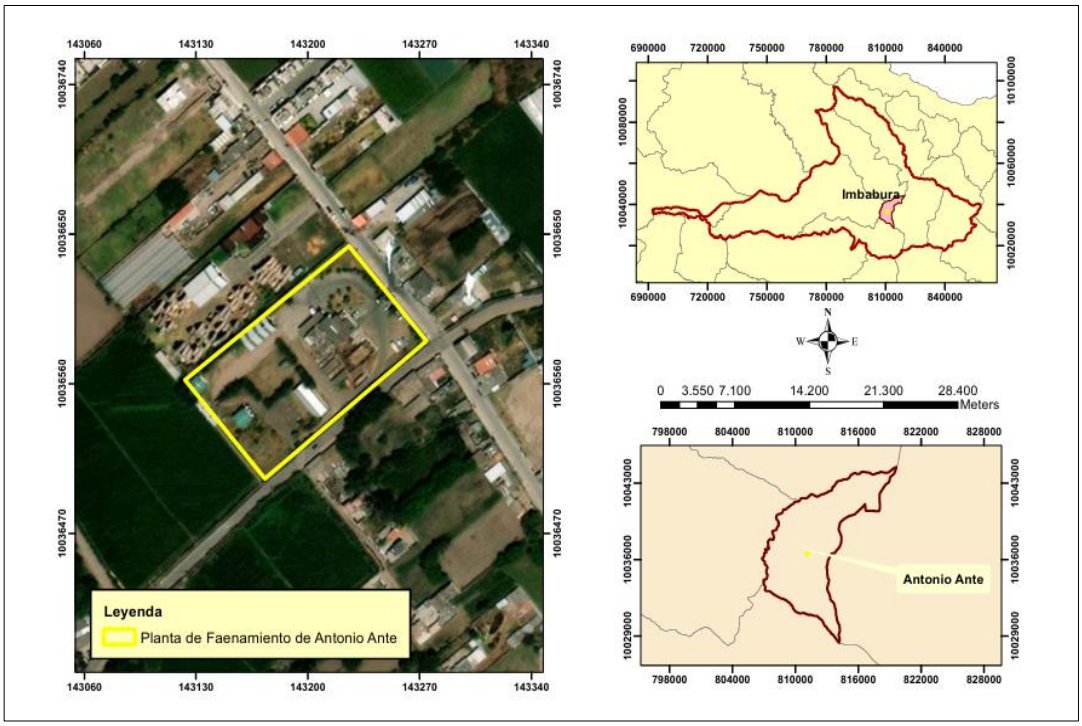
Este capítulo describe la metodología utilizada para el diseño del biodigestor prototipo, basada en un enfoque técnico y experimental. Se detallan etapas como la caracterización de residuos y dimensionamiento del sistema.

3.1 Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la Planta de Faenamiento de Antonio Ante, ubicada en la provincia de Imbabura, Ecuador (Figura 5). Esta instalación se dedica al procesamiento de ganado para consumo humano y cuenta con diferentes secciones operativas como: sala de recepción, área de faena, cuarto de refrigeración, cámara de congelación, planta de tratamiento de aguas residuales y zona de residuos (La Hora, 2024).

Figura 5

Mapa de ubicación de la Planta de Faenamiento de Antonio Ante



Nota. Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth (2025) y shapefile del cantón Antonio Ante proporcionado por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM, 2013).

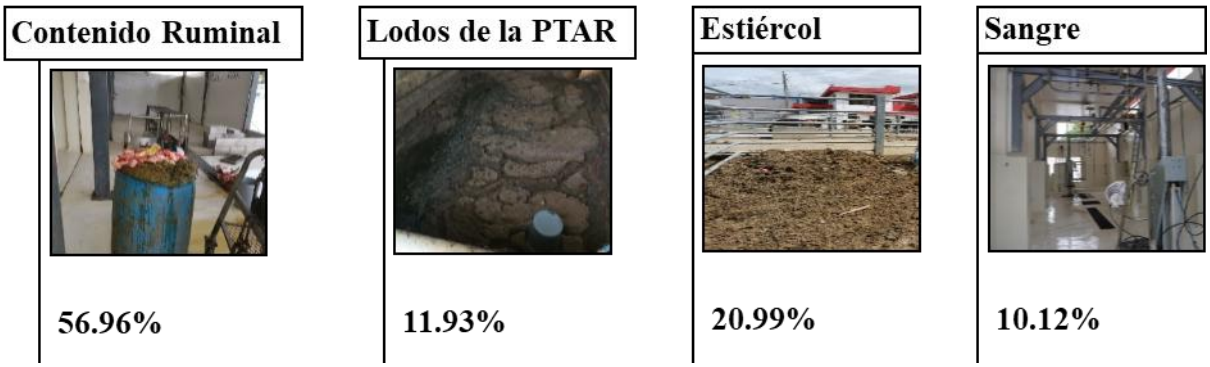
3.2 Métodos

3.2.1 Caracterización de la biomasa residual de la planta de faenamiento

Para la caracterización de la biomasa residual generada en la planta de faenamiento, se inició con la identificación e información, dada por parte de la empresa, de los residuos orgánicos acumulados en distintos sitios de la planta de faenamiento donde se presenta una producción promedio diario acumulado de todos los residuos de 257.13 kg (Figura 6). Posteriormente, se realizó la caracterización físico-química de las muestras recolectadas mediante un análisis proximal, que incluyó parámetros clave como el contenido de humedad (%), crucial para crear un ambiente adecuado para la actividad microbiana y el transporte eficiente de nutrientes (Tipán, 2020) los sólidos totales (ST) (%), que permite dimensionar adecuadamente el volumen del biodigestor y la carga orgánica del sistema, utilizando el método de secado en horno (Li et al., 2024) y los sólidos volátiles (SV) (%), que son determinantes en la producción de biogás. Este valor fue calculado mediante un análisis gravimétrico (Mrosso et al., 2023).

Figura 6

Puntos de acumulación y porcentaje de residuos generados en la planta



Nota. Valores del año 2023 expresados en porcentajes entregados por la Planta de Faenamiento de Antonio Ante.

Para la determinación del contenido de humedad, se utilizó el método gravimétrico por secado en horno. Inicialmente, se registró el peso del recipiente (W1) para luego colocar una muestra

húmeda de cada residuo orgánico, el cual fue introducido en un horno a 105 °C durante aproximadamente 18 horas hasta alcanzar un peso constante (W2). Una vez finalizado el secado, el recipiente con la muestra se dejó enfriar dentro del horno y se volvió a pesar (W3). Con estos valores se calculó el contenido de humedad del sustrato, aplicando la Ecuación 1 (Mrosso et al., 2023).

$$MC = \frac{(W_2 - W_1) - (W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1)} x100\% \qquad (Ec. 1)$$

Para cuantificar el porcentaje de sólidos totales (TS), se utilizó el método de secado en horno a una temperatura constante de 105°C. El cálculo del porcentaje de sólidos totales se realizó aplicando la Ecuación 2, siendo el porcentaje óptimo del 10% - 15% (Kelly Orhorhoro et al., 2017).

$$TS = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} x100\% \qquad (Ec. 2)$$

Para la determinación de los sólidos volátiles (SV), los residuos obtenidos tras el análisis de sólidos totales fueron incinerados en un horno a 550°C durante cuatro horas, hasta obtener cenizas. Posteriormente, el contenedor con la muestra se dejó en el horno para su enfriamiento. Finalmente, se registró el peso del contenedor con las cenizas (W4), y el porcentaje de sólidos volátiles se calculó aplicando la Ecuación 3 propuesta por Mrosso et al. (2023).

$$TVS = \frac{W_3 - W_4}{W_3 - W_1} x100\% \qquad (Ec. 3)$$

Para el análisis elemental las muestras fueron enviadas al laboratorio de Química Ambiental (OSP) en la facultad de Ciencias Química de la Universidad Central del Ecuador. Se utilizó el método de combustión para determinar el contenido total de carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N) presente en los residuos orgánicos, conforme a los lineamientos de la norma UNE-EN ISO 16948 (2015) (Méndez-Zetina et al., 2023).

3.2.2 Construcción de un biodigestor a escala laboratorio con parámetros de control

Se determinó los factores operativos y ambientales óptimos para la digestión anaerobia como el nivel de pH, la temperatura del sistema, relación materia orgánica - agua, la carga orgánica aplicada, la concentración de sólidos en el sustrato, el tiempo de retención hidráulico, la tasa de carga orgánica, la intensidad de la agitación y la presencia de compuestos inhibidores que se presentan en la Tabla 1 (Lorente et al., 2018).

Tabla 1

Rangos óptimos de parámetros fundamentales para la digestión anaerobia

Parámetros	**Rango Óptimo**	**Unidad**
pH	6.8 a 7.2	
Temperatura	30 a 40	°C
Carga orgánica	1.2 y 4.0	kg VS/m³/d
Tiempo de retención hidráulico	15–30	días
Materia orgánica - Agua	1:1	
Relación C/N	20 - 30	
Intensidad de agitación	Suave a moderada	

Para la selección del tipo de biodigestor más adecuado para el tratamiento del sustrato, se aplicó la técnica de análisis de decisión por criterios múltiples (MCDA). Esta metodología permitió evaluar diversas alternativas tecnológicas en función de criterios ponderados que consideran tanto aspectos técnicos como prácticos. Los factores incluidos en la matriz de decisión (Tabla 2) fueron: el costo del digestor, la disponibilidad local de materiales y diseño, la capacidad para regular la temperatura, el potencial de escalabilidad a mayores volúmenes, la idoneidad del sistema según el tipo de sustrato, la facilidad de construcción en laboratorio y la presencia o posibilidad de integrar un mecanismo de agitación (Njuguna Matheri et al., 2018).

Se utilizó el puntaje con sus respectivos criterios para finalmente seleccionar el tipo de biodigestor más adecuado.

Tabla 2

Matriz de alternativas de biodigestores

Variable	Criterio de evaluación	Biodigestor continuo	Biodigestor tipo batch
ECOLÓGICA	Capacidad para regular la temperatura		
	Estabilidad del proceso biológico		
	Tiempo de retención		
SOCIAL	Idoneidad del sistema según tipo de sustrato		
	Facilidad de construcción en laboratorio o comunidad		
	Aplicabilidad en condiciones artesanales o rurales		
	Disponibilidad local de materiales y diseño		
ECONÓMICA	Costo del digestor		
	Potencial de escalabilidad a mayores volúmenes		
	Presencia o posibilidad de integrar agitación		
	Mantenimiento requerido		

Se diseñó un prototipo de biodigestor adaptado a las condiciones locales y necesidades experimentales, con una capacidad total de 10 litros. El sistema fue construido con ACERO INOX de alta resistencia con un espesor de 2 mm. Contó con una entrada de alimentación, una salida de digestato y una válvula para la recolección del biogás generado. Además, se incorporó un sistema de control de temperatura para mantener condiciones mesofílicas estables y para

garantizar la homogeneidad de las mezclas, se integró un sistema de agitación en el reactor (Guimarães et al., 2018; Siciliano et al., 2022; Velásquez Cuadra & González Páez, 2022).

También se realizó un seguimiento continuo del pH durante toda la fase de digestión. Las mediciones se efectuaron con un sensor de pH SEN0169, el cual fue calibrado antes de cada uso con soluciones de pH 4, 7 y 10, siguiendo las recomendaciones metodológicas para el monitoreo de sistemas anaerobios (Sillero et al., 2022).

Parámetros Geométricos. El área de la sección transversal del biodigestor se calculó mediante la Ecuación 4:

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4} \qquad (Ec. 4)$$

Donde A es el área transversal (m^2) y D_i el diámetro interno del recipiente (m). Con este valor, la altura total del biodigestor se determina por la relación entre el volumen y el área transversal, como se indica en la Ecuación 5:

$$H = \frac{V_t}{A} \qquad (Ec. 5)$$

La altura total se divide en dos fracciones: altura del líquido (H_{liq}) y altura del espacio de gas o headspace (H_{hs}), asignando el 30% al headspace (Ecuación 6 y 7):

$$H_{liq} = (1 - f_{hs}) x H \qquad (Ec. 6)$$

$$H_{hs} = f_{hs} x H \qquad (Ec. 7)$$

Superficie Externa y Volumen del Material. El área externa del cilindro se calculó sumando las áreas laterales y de tapas (Ecuación 8):

$$A_{ext} = \pi D_i H + 2\left(\frac{\pi D_i^2}{4}\right) \qquad (Ec. 8)$$

El volumen del material del casco se estimó multiplicando el área externa por el espesor del metal como se muestra en la Ecuación 9:

$$V_{metal} = A_{ext} x t \qquad (Ec. 9)$$

La masa del casco metálico se calculó según la Ecuación 10:

$$M_{casco} = V_{metal} x \rho_{metal} \qquad (Ec. 10)$$

Pérdidas Térmicas. Para mantener la temperatura mesofílica del proceso, se estimaron las pérdidas térmicas mediante la Ecuación 11:

$$Q = U x A_{ext} x \Delta T \qquad (Ec. 11)$$

Una vez hecho el cálculo se utilizó una banda calefactora de 100 W ubicada entre 50 y 110 mm sobre el fondo del reactor, en el área correspondiente al tercio inferior de la cámara líquida, donde se produce la mayor transferencia térmica. El sensor PT100 se colocó a una distancia de 120 y 140 mm de la base, en el centro térmico del fluido del reactor, impidiendo que las lecturas sean influenciadas por temperaturas de zonas calientes. También se añadió una capa de aislamiento de 10 mm de espesor sobre la banda y la tapa, pues la parte superior del reactor suele ser la que presenta mayores pérdidas térmicas (Incropera, 2007). Estas propiedades garantizan que la temperatura se mantenga constante, en el rango mesofílico, evitando la formación de puntos de ebullición local o estrés térmico en el material del reactor (Canaza & Coaquira, 2025).

Comprobación Estructural. Para no comprometer la integridad del reactor, se llevaron a cabo cálculos de tensiones internas bajo condiciones de baja presión, teniendo en cuenta que la presión máxima de alivio es de 1000 Pa, que representa el límite de seguridad del sistema de biogás. Las tensiones circunferenciales y longitudinales se calcularon aplicando las ecuaciones de recipiente delgado (Ecuaciones 12 y 13) (Budynas & Nisbett, 2015):

$$\sigma_h = \frac{p\ x\ D_i}{2t} \qquad (Ec. 12)$$

$$\sigma_l = \frac{\sigma_h}{2} \qquad (Ec. 13)$$

Donde:

σ_h: Es la tensión circunferencial o de aro

σ_l: La presión longitudinal

p: La presión interna [Pa]

D_i: El diámetro interno [m]

t: El espesor del material [m]

La selección del sistema de agitación del digestor anaerobio de pequeña escala se fundamentó en parámetros operativos y del sustrato. El contenido sólido total, la viscosidad y la composición química del sustrato determinaron las características reológicas y, por ende, el tipo de agitador adecuado. De igual modo influyeron la escala volumétrica y geometría del tanque, la frecuencia de alimentación, y los límites de consumo energético y mantenimiento (Issahaku et al., 2024).

Para determinar la potencia necesaria de operación, se empleó la ecuación general de potencia para sistemas de agitación (Ecuación 14):

$$P = N_P x \rho x N^3 x\ D^5 \qquad (Ec. 14)$$

En este estudio se incorporó un sistema de acondicionamiento térmico con el objetivo de mantener condiciones óptimas durante la operación. Para alcanzar la temperatura óptima, se calculó el requerimiento energético total del sistema, considerando tanto la energía necesaria para elevar la temperatura inicial de la mezcla como la energía requerida para compensar las

pérdidas de calor a través de las superficies del biodigestor. En función de estos requerimientos, se seleccionó una resistencia tipo espiral, cuyas dimensiones fueron diseñadas para asegurar un régimen térmico adecuado para el proceso (Olvera et al., 2024).

Con el fin de asegurar una operación eficiente y segura del biodigestor, se procedió a su construcción. Se incorporaron válvulas específicas para facilitar el proceso de carga y descarga de sustratos, así como una válvula de salida para la recolección del biogás generado. En cuanto al monitoreo, se implementó un sistema electrónico compuesto por sensores de temperatura, pH, humedad, metano y TDS, los cuales fueron integrados con los módulos de procesamiento, almacenamiento y comunicación siguiendo el diagrama de la Figura 7 (García et al., 2011). Para la construcción del biodigestor prototipo se seleccionaron materiales que garantizan resistencia, hermeticidad y compatibilidad con procesos de biodigestión anaerobia. En la Tabla 3 se detallan los materiales utilizados, junto con sus cantidades y especificaciones técnicas, los cuales permitieron asegurar un funcionamiento adecuado del equipo durante la experimentación.

Figura 7

Diagrama de Conexión del Sistema de Monitoreo

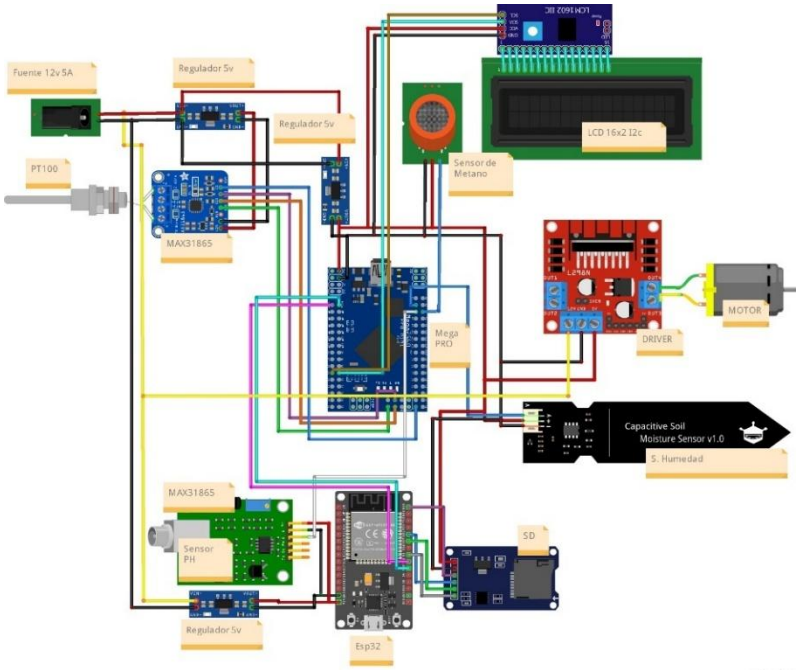


Tabla 3

Materiales, cantidades y especificaciones técnicas utilizadas para la construcción del biodigestor prototipo.

Ítem	Cantidad	Especificación técnica
ESP32-DevKitC (Wi-Fi/BLE)	1 (Con Arduino)	MCU dual-core, 3.3 V, ADC 12 bits, Wi-Fi 2.4 GHz, BLE 4.x. Alimentación 5 V por USB o 3.3 V pin.
Arduino UNO R3 (compatible)	1 (Con ESP32)	ATmega328P, 5 V, 16 MHz, 6 entradas analógicas. Útil si se requiere 5 V nativo para sensores analógicos.
Fuente conmutada 12 V DC 5 A	1	Entrada 100–240 VAC; salida 12 V/5 A para motores, válvulas y bombas.
Step-down DC-DC LM2596 12→5 V 3 A	1	Alimenta MCU y sensores. Ajuste a 5.0 V. Recomendado disipador.
Portafusibles + Fusibles 5×20 (2 A y 5 A)	1 + Variado	Protección primaria de 12 V y líneas de carga.
Diodo TVS 12 V (600–1500 W)	1	Protección contra transitorios en bus de 12 V.
Varistor MOV 14D471 (si hay AC)	1	Supresor de picos en entrada AC de la fuente.
Borneras atornillables (2/3/4 vías)	Variado	Distribución segura de potencia y señales.
Cableado: 2×1 mm² (12 V) y 22–24 AWG (señal)	Según tiradas	Separación de rutas potencia/señal; ferrules recomendadas.
Temperatura de sustrato DS18B20 (sumergible)	1	Rango −55 a 125 °C, precisión ±0.5 °C (−10 a 85 °C), acero 304, cable silicona/teflón.
Temp./Humedad ambiente SHT31	1	I²C, T ±0.3 °C, HR ±2% RH. Para gabinete/ambiente.
Presión de biogás 0–30 kPa (0.5–4.5 V)	1	Transductor piezorresistivo, alimentación 5 V, salida ratiométrica.
Nivel (flotador ON/OFF)	2	Acero/plástico; contacto reed; montaje vertical u horizontal.

Ítem	Cantidad	Especificación técnica
pH Pro (SEN0169) + módulo acondicionador	1	Sonda doble unión, salida analógica; calibración 2–3 puntos. Cable BNC blindado.
Buffers pH 4.00/7.00/10.01	3 sobres o botellas	Calibración inicial y mantenimiento mensual.
Solución KCl 3 M	1 frasco	Almacenamiento del electrodo de pH (no agua destilada).
Motor DC 12 V con caja reductora (60–120 rpm)	1	Eje Ø 6 mm; par alto para agitación continua.
Driver BTS7960 (43 A) o L298N	1	BTS7960 recomendado por robustez; L298N para motores pequeños.
Válvula solenoide gas 12 V NC 1/2"	1	Latón; sello NBR/Viton; normalmente cerrada; para corte de biogás.
Bomba peristáltica 12 V (60–100 ml/min)	1	Manguera silicona; adecuada para dosificación de efluente/afluente.
MOSFET lógico IRLZ44N (o módulo MOSFET)	1	Conducción directa 3.3/5 V; diodo flyback en cargas inductivas.
Módulo microSD (SPI)	1	Registro de datos (.CSV). Formateo FAT32; nivel lógico 3.3 V.
RTC DS3231 con batería	1	Reloj tiempo real; precisión ±2 ppm; I²C.
Bluetooth HC-05 (si usas Arduino UNO)	1 (opcional)	Configuración AT; alternativa si no se usa ESP32.
Conector USB tipo panel (alargador)	1	Facilita actualización sin abrir gabinete.
Zumbador piezo 5 V	1	Alarmas acústicas locales.
Gabinete Impresión 3D	1	Resistente a salpicaduras; admite prensaestopas.
Riel DIN + base (≈15–20 cm)	1	Para fijación de fuente, SSR, borneras.
Prensaestopas PG7/PG9	Variado	Selle de paso de cables; alivio de tensión.
Tornillería INOX M3/M4 + separadores	Variado	Evita corrosión; facilita montaje de placas.

Bridas, termocontraíble, puntas férula	Variado	Ordenado del cableado y terminaciones seguras.
Etiquetas	Variado	Identificación de señales y potencia.

Una vez finalizada la construcción del biodigestor, se realizó su carga inicial con la mezcla previamente preparada. Esta ocupó el 70 % del volumen total del reactor, mientras que el 30 % restante se dejó libre para permitir la acumulación de biogás (Martina et al., 2005a). La cuantificación de la energía generada se realizó a partir del volumen de biogás producido (Beniche et al., 2021).

La producción diaria de biogás se determinó mediante un manómetro instalado en la salida del reactor, registrando las lecturas de presión a la misma hora todos los días durante el periodo experimental para cada una de las mezclas. Para calcular el volumen generado entre dos mediciones consecutivas, se aplicó la ecuación utilizada por do Valle et al. (2026) (Ecuación 15).

$$V_{Biogás} = \frac{P\ x\ V_{hs}\ x\ C}{R\ x\ T} \qquad (Ec. 15)$$

Donde:

$B_{iogás}$: Volumen diario de biogás [ml]

P: Diferencia de presión [mbar]

V_{hs}: Volumen del espacio de cabeza del reactor [mL]

C: Volumen molar del gas ideal [22,41 $L \cdot mol^{-1}$]

R: Constante universal de los gases [83,14 $L \cdot mbar \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]

T: Temperatura absoluta del sistema [K].

A partir de estas mediciones se determinó tanto el volumen acumulado como la tasa diaria de generación, expresando los resultados en condiciones normales de temperatura y presión (NmL y NmL·día^{-1}), es decir, referidos a 0°C y 101.33 kPa. Esta normalización resultó esencial para comparar la producción de biogás entre las mezclas evaluadas y con valores reportados en la literatura (do Valle et al., 2026). La cuantificación de la energía generada se realizó posteriormente a partir del volumen de biogás y su composición.

3.2.3 Diseño experimental

Se empleó un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) de un factor con dos niveles para comparar el rendimiento de dos mezclas de sustratos residuales (Tabla 4) en la producción de biogás, con tres repeticiones cada una, adaptado a las condiciones de un ensayo con un solo biodigestor a escala de laboratorio (Montgomery, 2017; Sarabia Méndez et al., 2017).

Tabla 4
Mezcla de sustratos

Mezclas	**Tratamientos evaluados**
Mezcla 1	CR + E + S + PTAR
Mezcla 2	CR + E

Cada tratamiento contó con 3 réplicas (n=3), totalizando 6 unidades experimentales. Este número de réplicas permite estimar la variabilidad experimental y proveer suficiente potencia estadística para detectar diferencias significativas entre tratamientos.

3.2.4 Análisis estadístico

Para el proceso y análisis de los datos obtenidos en la evaluación del rendimiento de biogás para la generación eléctrica y térmica se llevó a cabo mediante el software estadístico Minitab 17, siguiendo una metodología estructurada que integró tanto los análisis descriptivos

como inferenciales. Inicialmente se realizó un análisis estadístico descriptivo calculando medidas de tendencia central y dispersión para cada variable respuesta, incluyendo la media aritmética, error estándar, desviación estándar, coeficiente de variación y valores mínimos y máximos. Esta caracterización inicial permitió comprender el comportamiento general de cada mezcla y detectar posibles valores atípicos en los datos experimentales, estableciendo así una base sólida para los análisis subsiguientes (Reyes Aguilera & Pérez Castellón, 2019).

Previo a la aplicación de pruebas inferenciales, se verificaron los supuestos estadísticos fundamentales requeridos para garantizar la validez de los análisis paramétricos. Específicamente, se evaluó la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro – Wilk y la homocedasticidad mediante la prueba de Levene, ambas con un nivel de significancia establecido $\alpha = 0.05$. La independencia de las observaciones quedó garantizada por el diseño completamente aleatorizado implementado en el estudio. Una vez confirmado el cumplimiento de estos supuestos, se procedió con la prueba estadística inferencial apropiada para el diseño experimental (Angel et al., 2017).

Considerando que la investigación contempla la comparación de dos grupos independientes a las dos mezclas de sustratos evaluadas (Tabla 5), se aplicó la prueba t para muestras independientes con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ Esta prueba permitió determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en las variables respuesta entre ambos tratamientos. Complementariamente, se calculó el tamaño del efecto mediante la d de Cohen para cuantificar la magnitud práctica de las diferencias encontradas, interpretándose los valores obtenidos como efecto pequeño (d = 0.2), mediano (d = 0.5) o grande (d = 0.8), lo que enriquece la interpretación de los resultados al proporcionar información sobre la relevancia práctica además de la significación estadística (Angel et al., 2017).

Las variables analizadas incluyeron el volumen diario de biogás producido, la concentración de metano en el biogás, la energía eléctrica y térmica potencial generada, así como la reducción de sólidos volátiles. Los resultados se presentaron mediante tablas resumen y gráficos de barras con intervalos de confianza al 95%, facilitando la interpretación visual de las diferencias entre tratamientos. Todo este proceso analítico permitió validar estadísticamente el cumplimiento de los objetivos planteados y contrastar de manera rigurosa las hipótesis de investigación formuladas en el estudio. Los resultados obtenidos fueron presentados en tablas y gráficos para facilitar su interpretación y discusión (Sarabia Méndez et al., 2017).

Tabla 5

Variables independientes y dependientes consideradas en el análisis estadístico.

Variables independientes	**Variables dependientes**
Tipo de mezcla del sustrato residual	Volumen de biogás producido (L/día o m^3/día) Energía eléctrica generada (kWh) Energía térmica generada (kcal o MJ).

3.2.5 Preparación de mezclas

La selección de los dos sustratos evaluados se basó en dos criterios fundamentales: la disponibilidad local de los residuos y su relación Carbono – Nitrógeno (C/N). Para la preparación de las mezclas a evaluar, en base al valor de los sólidos totales, se calculó la masa seca del sustrato y se estableció una proporción de dilución adecuada con agua. La cantidad de agua que se requiere por cada kilogramo o gramo de residuo fresco no se elige al azar, sino que se calcula mediante la relación 1:1. Esta proporción se aplicó en todas las mezclas preparadas, con el fin de asegurar condiciones homogéneas de carga inicial. La mezcla obtenida se cargó completamente en el biodigestor, considerando que el sistema opera bajo el principio tipo

batch, sin nuevas alimentaciones durante el proceso (Basurto & Corrales, 2017; Bolaños, 2019; Gómez-Camperos et al., 2022).

Para determinar la relación Carbono/Nitrógeno de las mezclas se utilizó la Ecuación 16 (Carvajal Jara et al., 2018; Montalbán Romero, 2020).

$$\frac{C}{N} = \frac{\%CxM + \%CxM}{\%NxM + \%NxM} \qquad (Ec. 16)$$

Donde:

%C: porcentaje de carbono del sustrato

%N: porcentaje de nitrógeno del sustrato

M: masa del sustrato en la mezcla

La evaluación del rendimiento del biogás para la generación eléctrica y térmica, se realizó mediante un enfoque experimental basado en la codigestión anaeróbica de mezclas de residuos orgánicos, entre ellos contenido ruminal, sangre, lodos (PTAR) y estiércol. Este proceso permitió simular, en pequeña escala de laboratorio, el comportamiento del sustrato durante la digestión anaeróbica, proporcionando así una estimación directa del volumen de metano que puede generarse (Ware & Power, 2017).

3.2.6 Evaluación del rendimiento de biogás para la generación eléctrica y térmica a partir de las mezclas del sustrato residual

La eficiencia de producción de biogás se mide principalmente por dos factores: el volumen de biogás generado por unidad de masa de sustrato y la concentración de metano (% CH_4) en ese biogás. Esta concentración se determinó mediante cromatografía de gases, lo cual permite conocer el poder calorífico del biogás y, por tanto, su potencial para ser convertido en energía útil (Angelidaki et al., 2009).

El poder calorífico del biogás se determinó a partir de su contenido de metano, ya que este compuesto es el principal responsable de su valor energético. Para calcular la energía potencial, se empleó la siguiente ecuación basada en el volumen total de biogás generado, el porcentaje de metano presente y el poder calorífico inferior (PCI) del metano, que se estima en aproximadamente 9.97 kWh/m³ (Ecuación 17).

$$E_{BG} = V_{BG} \times \left(\frac{\%CH_4}{100}\right) \times PCI_{CH_4} \qquad (Ec.17)$$

Donde:

E_{BG}: Energía contenida en el biogás (kWh)

V_{BG}: Volumen total de biogás producido (m³)

$\%CH_4$: Porcentaje de metano en el biogás

PCI_{CH_4}: Poder calorífico inferior del metano ≈ 9.97 kWh/ m³

Para evaluar el rendimiento total del sistema de generación, es esencial calcular distintos tipos de eficiencia: eléctrica, térmica y total (L. Appels et al., 2011a; Holm-Nielsen et al., 2009a).

Para la determinación de la eficiencia eléctrica su cálculo se realizó a partir de la relación entre la energía eléctrica generada y la energía total, según la Ecuación 18 propuesta por Holm-Nielsen et al., (2009).

$$\eta_{el} = \left(\frac{E_{el}}{E_{BG}}\right) \times 100 \qquad (Ec.18)$$

η_{el}: Eficiencia eléctrica (%)

E_{el}: Energía eléctrica medida en salida del generador (kWh)

La eficiencia térmica mide la fracción de energía térmica útil recuperada en relación con la energía total disponible en el biogás, se evaluó de manera integral el rendimiento energético del sistema, con la siguiente Ecuación 19 (Kabeyi & Olanrewaju, 2022).

$$\eta_{th} = \left(\frac{E_{th}}{E_{BG}}\right) \times 100 \qquad (Ec. 19)$$

η_{th}: Energía térmica recuperada (kWh)

De acuerdo con estudios técnicos, los sistemas de cogeneración pueden alcanzar una eficiencia total del 70% al 90%, superando ampliamente a los sistemas que solo generan electricidad. Esta tecnología resulta especialmente beneficiosa en entornos agroindustriales, plantas de tratamiento de aguas y comunidades que buscan un aprovechamiento energético más eficiente (L. Appels et al., 2011a; Weiland, 2010).

El diseño del escalado del biodigestor prototipo se realizó a partir de la caracterización de la biomasa residual generada en la planta de faenamiento, con el objetivo de establecer una unidad funcional que permita validar la digestión anaerobia como alternativa de valorización energética. Para ello, se consideraron variables claves como el volumen diario de residuos, la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica (TRH), así como las condiciones operativas ideales para maximizar la producción de biogás. Este proceso de diseño se realizó en base a las metodologías ampliamente aceptadas para la adaptación de biodigestores a condiciones locales y fue ajustado a escala piloto considerando parámetros técnicos y ambientales del sitio (Alarcón, 2016).

Para estimar el potencial de producción de biogás a escala real a partir de los resultados experimentales de laboratorio, se aplicó un método de escalado teórico por proporcionalidad lineal directa, asumiendo que la producción de biogás es directamente proporcional a la masa

de sustrato alimentado. Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de prefactibilidad de plantas de biogás a pequeña escala (Ecuación 20) (Alarcón, 2016; Justine et al., 2024).

$$V_{escala} = V_{laboratorio} x \left(\frac{M_{escala}}{M_{laboratorio}}\right) \quad (Ec. 20)$$

Donde:

V_{escala}: Volumen de biogás estimado a escala real (m³/día)

$V_{laboratorio}$: Volumen de biogás obtenido experimentalmente (m³)

M_{escala}: Masa de sustrato disponible diariamente en la planta (kg/día)

$M_{laboratorio}$: Masa de sustrato utilizada en el ensayo de laboratorio (kg)

El dimensionamiento del volumen del biodigestor a escala real se realizó considerando el tiempo de retención hidráulica (TRH) óptimo de 15 días, determinado experimentalmente en este estudio. El volumen total del digestor se calculó mediante la Ecuación 21.

$$V_{total} = \frac{V_{operativo}}{0.70} \quad (Ec. 21)$$

Donde $V_{operativo} = Carga\ diaria\ x\ TRH$, y el factor 0.70 corresponde al 70% del volumen total destinado a la fase líquida, dejando un 30% como espacio de cabeza (headspace) para acumulación de biogás (Martina et al., 2005b).

Finalmente, para ajustar las estimaciones teóricas a las condiciones reales de operación industrial, se aplicó un factor de corrección de potencial de metano bioquímico (BMPCC) propuesto por Pilarski et al. (2020).Este coeficiente corrige las diferencias entre la producción de metano a escala laboratorio y la obtenida a escala real, las cuales pueden variar entre 1.14% y 23.58% dependiendo del tipo de sustrato y las condiciones operativas (Ecuación 22 y 23).

$$BMP_{real} = BMP_{laboratorio} x BMPCC \quad (Ec. 22)$$

Donde:

BMP_{real}:Potencial de metano real a escala industrial (m³ CH_4/kg VS)

$BMP_{laboratorio}$:Potencial de metano obtenido en laboratorio (m³ CH_4/kg VS)

BMPCC: Coeficiente de corrección de potencial de metano bioquímico (adimensional)

$$V_{real} = V_{estimado} x BMPCC \qquad (Ec. 23)$$

Donde:

V_{real}: Producción de biogás corregida (m³/día)

En este estudio se adoptó un valor conservador de BMPCC = 0.85 para obtener una estimación realista de la producción de biogás a escala industrial. La generación de energía eléctrica y térmica se calculó aplicando eficiencias de conversión del 30% y 45% respectivamente, valores típicos para pequeños sistemas de cogeneración (Ecuación 24 y 25) (L. Appels et al., 2011b; Holm-Nielsen et al., 2009b).

$$E_{eléctrica} = V_{real} x \%CH_4 x PCI_{CH_4} x \eta_{eléctrica} \qquad (Ec. 24)$$

$$E_{térmica} = V_{real} x \%CH_4 x PCI_{CH_4} x \eta_{térmica} \qquad (Ec. 25)$$

Donde:

$\%CH_4$: Concentración de metano (58% = 0.58)

PCI_{CH_4}: Poder calorífico inferior del metano (9.97 kWh/m³)

$\eta_{eléctrica}$: Eficiencia de conversión eléctrica (30% = 0.30)

$\eta_{térmica}$: Eficiencia de conversión térmica (45% = 0.45)

3.3 Materiales, equipos y software

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon diversos materiales de campo, materiales de laboratorio, equipos especializados y herramientas informáticas que permitieron ejecutar cada una de las etapas metodológicas con precisión y confiabilidad. Todos los recursos empleados se detallan de manera organizada en la Tabla 6, correspondiente a las distintas fases del proyecto.

Tabla 6

Recursos utilizados en las diferentes etapas del proyecto.

Materiales de campo	**Materiales de laboratorio**	**Equipos**	**Software**
Guantes de Nitrilo	Tubos de ensayo	Balanza analítica	SolidWorks
Fundas de plástico	Tiras reactivas de pH	Horno	Microsoft Excel
Contenedores de plástico		Trituradora	Minitab
Cámara móvil		Horno mufla	MATLAB

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de los objetivos planteados en el estudio. Estos están representados en tablas y figuras que evidencian el rendimiento del proceso de biodigestión para su escalado.

4.1 Caracterización de la biomasa residual por tipo de la planta de faenamiento

4.1.1 Contenido de Humedad

Después de aplicar el método gravimétrico descrito en la metodología, se obtuvieron diferentes porcentajes de humedad para cada tipo de residuo evaluado. En la Tabla 7 se muestran los valores promedio obtenidos para las muestras de estiércol, contenido ruminal, sangre y lodos de la PTAR. En general, se observó que el residuo con mayor contenido de agua fue el contenido ruminal (84.71 %), mientras que el más seco resultó ser el estiércol (58.34 %). Estos valores son coherentes con lo reportado en la literatura para residuos de plantas de faenamiento donde se alcanzaron valores de hasta el 80.1 % en residuos similares (Armijo Hidalgo & Vera Sanchez, 2024; Bernal & Aguirre, 2019).

Tabla 7

Promedio de humedad de los residuos en porcentaje

Tipo de residuo	**Humedad [%]**
E	58.34
CR	84.71
S	72.60
PTAR	81.93

4.1.2 Sólidos Totales

Los sólidos totales fueron calculados mediante la Ecuación 3. Se observó que los residuos con mayor concentración de TS correspondieron al Estiércol (41.66 %), siendo mayor según lo reportado por Reyes & Pérez (2019) mientras que los residuos con menor porcentaje de TS fue el contenido ruminal (15.29 %) (Tabla 8).

Tabla 8

Porcentaje de Sólidos Totales de los residuos

Tipo de residuo	Sólidos Totales [%]
E	41.66
CR	15.29
S	27.40
PTAR	18.07

4.1.3 Análisis elemental

El análisis elemental mostró que el contenido de carbono varió en un rango entre 28.76 % y 46.75 %, el nitrógeno entre 2.89 % y 14.79 %, y el hidrógeno entre 4.44 % y 7.66 % según la mezcla analizada (Tabla 9). A partir de estos valores, se calculó la relación C/N, en la cual el estiércol y el contenido ruminal tuvieron los valores más altos.

Tabla 9

Resultados promedio del análisis elemental

Sustrato Residuo PF	H [%]	N [%]	C [%]	C/N
E	6.01	2.91	41.57	14:1
CR	5.94	2.89	38.82	13:1
S	7.69	14.79	46.75	3:1
PTAR	4.44	3.81	28.76	8:1

4.2 Caracterización de las mezclas de biomasa residual de la planta de faenamiento

A partir de los datos de generación de residuos de la Planta de Faenamiento de Antonio Ante, se calcularon los porcentajes reales de cada flujo, los cuales se utilizaron para formular dos mezclas experimentales. La Mezcla 1 incluye todos los residuos generados en la planta, mientras que la Mezcla 2 considera únicamente las fracciones principales (contenido ruminal y estiércol), para las cuales se recalcularon los porcentajes relativos (Tabla 10).

Tabla 10

Composición porcentual de las mezclas preparadas

Residuo	Porcentaje real en Planta [%]	Mezcla 1 [%]	Mezcla 2 [%]
CR	56.96	56.96	73.07
E	20.99	20.99	26.93
S	10.12	10.12	–
PTAR	11.93	11.93	–

4.2.1 Contenido de Humedad y Sólidos Totales

Los valores de humedad y sólidos totales fueron determinados mediante el método gravimétrico por secado a 105°C, utilizando las ecuaciones establecidas en la metodología (Tabla 12) (Figura 8). Ambas muestras presentaron valores superiores al 85% respecto al MC, siendo la muestra de contenido ruminal y estiércol la de mayor contenido humedad (89.46%). Según Adnane et al. (2024),dichos parámetros resultan de gran importancia debido a su impacto significativo en el rendimiento general del proceso y para la determinación de la mezcla óptima de materias primas.

Tabla 11

Resultados de humedad y sólidos totales de las mezclas

Muestra	Contenido de Humedad [%]	Sólidos Totales [%]
CR + E + S + PTAR	87.154	12.846
CR + E	89.457	10.543

Los valores de humedad obtenidos (>85%) son característicos de los residuos generados en plantas de faenamiento. Según Salminen & Rintala (2002), la sangre puede contener hasta un 85% de agua, mientras que el contenido ruminal presenta altos niveles de humedad debido a los fluidos digestivos presentes. Los valores de sólidos totales obtenidos (10.54% para M2 y 12.85% para M1) se encuentran dentro del rango óptimo para procesos de digestión anaerobia húmeda (10-15%).

Figura 8

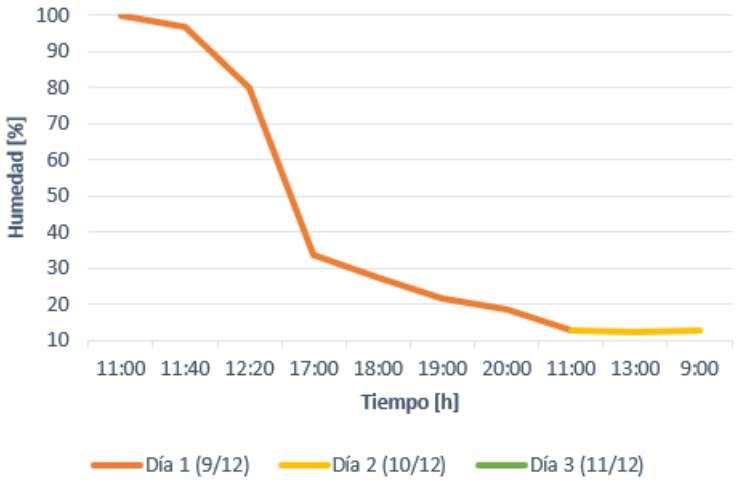
Pesaje y preparación de mezclas para determinación de humedad y sólidos totales



Para comprender la cinética de pérdida de agua durante el secado, se desarrolló la curva de humedad en función al tiempo, donde se tomaron datos en lapsos de tiempo hasta que la mezcla obtenga un peso constante (Figura 9 y 10).

Figura 9

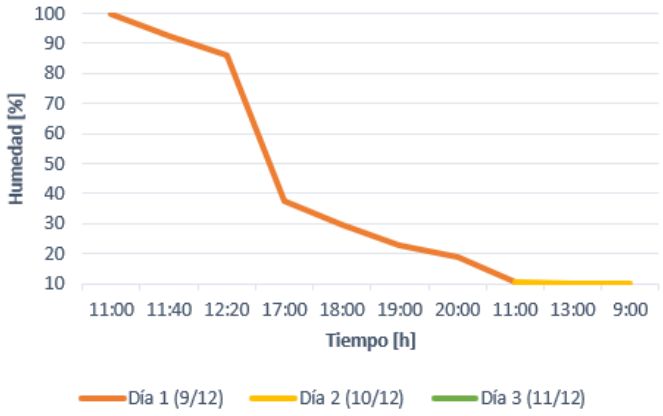
Curva de secado de la mezcla 1



Se observa una disminución progresiva de la variable analizada a lo largo del tiempo. Inicialmente los valores se mantienen altos, cercanos a 100, pero entre las 12:20 y 17:00 se presenta una caída más pronunciada. Después de este descenso, los valores continúan disminuyendo de manera más lenta hasta estabilizarse cerca de los valores mínimos registrados al final del periodo evaluado.

Figura 10

Curva de secado de la mezcla 2



Se aprecia una tendencia descendente de la variable estudiada. Al inicio, los valores disminuyen de forma gradual; sin embargo, alrededor de las 17:00 ocurre un

descenso más notable y la reducción continúa de manera más estable y lenta, alcanzando los valores más bajos en las últimas mediciones realizadas.

4.2.2 Sólidos Volátiles de las Mezclas

Los análisis realizados permitieron determinar el porcentaje de sólidos volátiles (SV) presentes en la mezcla utilizada como sustrato del biodigestor (Tabla 12) (Figura 11). Los SV representan la fracción orgánica biodegradable y, por lo tanto, constituyen un indicador directo del potencial de producción de biogás. Los resultados mostraron que la mezcla 1 presentó una concentración elevada de materia orgánica susceptible de degradación, lo cual es consistente con estudios que destacan el alto contenido de fibras, proteínas y compuestos volátiles en residuos ruminales.

Tabla 12

Resultados de sólidos volátiles (SV) de la mezcla utilizada

Muestra	**Sólidos Volátiles [%]**
CR + E + S + PTAR	79.307
CR + E	79.157

El alto contenido de sólidos volátiles (>79%) en ambas mezclas es consistente con lo reportado por Ware & Power (2017) para residuos de plantas de faenamiento. Según Angelidaki et al. (2009), valores de SV superiores al 70% indican un alto potencial de producción de metano, ya que la fracción volátil corresponde a la materia orgánica susceptible de ser degradada por los microorganismos anaerobios.

Figura 11

Preparación de mezclas para evaluación de sólidos volátiles



4.2.3 Relación Carbono-Nitrógeno de Mezclas de Sustrato

Para cada una de las mezclas evaluadas se realizó el cálculo de la relación carbono-nitrógeno (C:N) (Tabla 13 y 14) utilizando la ecuación de sumatoria ponderada, en la cual el aporte de carbono y nitrógeno de cada sustrato se obtiene multiplicando su porcentaje correspondiente por la masa incluida en la mezcla (Ecuación 16, p. 30) (Figura 12) Las relaciones C/N obtenidas (9.23 para M1 y 13.60 para M2) están por debajo del rango óptimo teórico de 20-30:1 reportado en la literatura por Wang et al. (2014).

Tabla 13

Determinación de la relación C:N de la mezcla 1

Residuo	**Masa [g]**	**C [%]**	**C [g]**	**N [%]**	**N [g]**
CR	2392.32	38.82	928.70	2.89	69.14
E	881.58	40.9	360.57	2.91	25.65
S	425.04	46.75	198.71	14.79	62.86
PTAR	501.06	28.76	144.10	3.81	19.09
Total	**4200**	—	**1632.08**	—	**176.75**

$$\frac{C}{N} = \frac{1632.08}{176.75} = 9.23$$

Tabla 14

Determinación de la relación C:N de la mezcla 2

Residuo	Masa [g]	C [%]	C [g]	N [%]	N [g]
CR	3069.04	38.82	1191.40	2.89	88.70
E	1130.96	40.9	462.56	2.91	32.91
Total	**4200**	—	**1653.96**	—	**121.61**

$$\frac{C}{N} = \frac{1653.96}{121.61} = 13.60$$

Figura 12

Preparación de mezclas para análisis elemental



4.2.3 Discusión sobre la naturaleza y el comportamiento de los residuos

La selección de los residuos para las mezclas experimentales (contenido ruminal -CR-, estiércol -E-, sangre -S- y lodos de PTAR) se basó en sus características fisicoquímicas y en su potencial para la digestión anaerobia, considerando tanto sus ventajas como sus posibles efectos inhibidores.

El contenido ruminal (CR), al ser un residuo lignocelulósico parcialmente digerido, representa una fuente rica en carbohidratos complejos (celulosa, hemicelulosa) y proteínas, con una alta proporción de sólidos volátiles (38.82% C, 2.89% N, SV ~79%). Su digestión es relativamente lenta, pero proporciona una base estable para el proceso. El estiércol (E) actúa como un excelente buffer, aportando una comunidad microbiana diversa y nutrientes que ayudan a estabilizar el proceso, además de ser una fuente de materia orgánica fácilmente degradable (Hejnfelt & Angelidaki, 2009).

Los mayores desafíos provienen de la sangre (S) y los lodos de PTAR. La sangre es un sustrato con un altísimo contenido proteico, reflejado en su elevado porcentaje de nitrógeno (14.79%). Si bien este alto contenido de nitrógeno es un nutriente, su rápida hidrólisis puede llevar a la generación de amonio libre (NH_3), que en concentraciones elevadas es tóxico para las bacterias metanogénicas (Chen et al., 2008). Esta es la razón principal por la que la incorporación de sangre en la Mezcla 1 resultó en una mayor producción de biogás (por su rápida degradación), pero también en una inestabilidad y alta variabilidad en el proceso, evidenciada por su alto coeficiente de variación (CV = 18.4%). La sangre es, por tanto, un sustrato de "alta energía" pero también de "alto riesgo" (Rajagopal et al., 2013).

La codigestión anaerobia consiste en mezclar diferentes sustratos para aprovechar sus propiedades complementarias, mejorar el balance de nutrientes (como la relación

C/N), diluir compuestos tóxicos y, en última instancia, aumentar el rendimiento de metano (Mata-Alvarez et al., 2014).

Mezcla con residuos de cocina o vegetales. Añadir un sustrato rico en carbono, como residuos de frutas y verduras (F&V) o residuos de comida, a la mezcla de la Planta de Antonio Ante podría ser beneficioso. La relación C/N de la Mezcla 1 (9.23) es muy baja debido al exceso de nitrógeno de la sangre. Al incorporar residuos con una alta relación C/N (con C/N > 30), se puede equilibrar esta proporción, acercándola al rango óptimo de 20-30:1. Esto reduciría el riesgo de inhibición por amonio y podría estabilizar el proceso, mejorando la producción de metano y la biodegradabilidad general (FAO, 2019). Sin embargo, es importante señalar que si bien este tipo de codigestión puede acelerar la cinética del proceso, no siempre incrementa la biodegradabilidad última, funcionando a menudo como un mecanismo de dilución de inhibidores (Mata-Alvarez et al., 2014).

Mezcla con residuos de matadero de otro tipo (grasas). Los residuos con alto contenido lipídico (grasas) tienen un potencial de metano muy alto, pero su degradación es lenta y puede causar inhibición por ácidos grasos de cadena larga (AGCL). La codigestión con contenido ruminal o estiércol podría mitigar esta inhibición, ya que la fracción particulada de estos sustratos ayuda a adsorber los AGCL y a diluir la carga orgánica, mejorando la cinética del proceso y el rendimiento final (Hejnfelt & Angelidaki, 2009).

Para el contexto de la Planta de Antonio Ante, la codigestión de la Mezcla 1 con residuos vegetales o de cocina de la región podría ser una estrategia viable para mejorar la estabilidad, reducir el riesgo de inhibición y aumentar potencialmente el rendimiento energético, al equilibrar la alta carga nitrogenada de los residuos sanguíneos.

4.3 Construcción de un biodigestor a escala laboratorio con parámetros de control

4.3.1. Cálculos para diseño del Biodigestor

El proceso de construcción del biodigestor a escala de laboratorio se desarrolló con base en los parámetros operativos y ambientales definidos en la metodología, con el propósito de garantizar condiciones óptimas para la digestión anaerobia y obtener un prototipo funcional y estable. La integración de estos parámetros resultó fundamental para asegurar la estabilidad del proceso biológico y favorecer la actividad microbiana responsable de la metanización.

A partir del volumen nominal seleccionado para el prototipo, se calculó la altura del reactor según la ecuación geométrica del cilindro (Ecuación 6, p. 21):

$$H = \frac{V_t}{A} = \frac{0.006\ m^3}{\frac{\pi(0.150m)^2}{4}} = 0.34\ m$$

El volumen líquido operativo y el headspace se determinaron aplicando la fracción establecida del 70 % para la mezcla y 30 % para la cámara de gas (Ecuación 7 y 8, p. 21):

$$H_{liq} = 0.7\ x\ H = 0.238$$

$$H_{hs} = 0.3\ x\ H = 0.102$$

Las pérdidas térmicas del reactor fueron estimadas mediante la ecuación de transferencia de calor (Ecuación 12, p. 21):

$$Q = 5\frac{W}{m^2\ x\ °C}\ x\ 0.195\ m^2\ x\ 15\ °C = 14.651\ W$$

Las tensiones generadas en el casco se evaluaron para verificar la seguridad estructural (Ecuación 13, p. 22):

$$\sigma_h = \frac{100\ Pa\ x\ 0.150\ m}{2\ x\ 0.002\ m} = 0.038\ MPa$$

La elección del tipo de biodigestor fue un paso clave para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema y mantener condiciones estables durante la digestión anaerobia. Para esto, se aplicó una matriz de criterios múltiples (MCDA) que permite comparar alternativas considerando factores ecológicos, sociales y económicos tal como sugieren (Guimarães et al., 2018; Lorente et al., 2018). Para la asignación de puntuaciones (Tabla 15), se consideraron las características técnicas reportadas por Vandevivere et al. (2003). Mediante la matriz se consideró al biodigestor tipo batch como la mejor opción.

Tabla 15

Matriz de criterio múltiple

Variable	Criterio de evaluación	Biodigestor continuo	Biodigestor tipo batch
ECOLÓGICA	Capacidad para regular la temperatura	2	3
	Estabilidad del proceso biológico	3	3
	Tiempo de retención	2	3
	Idoneidad del sistema según tipo de sustrato	2	3
	Facilidad de construcción en laboratorio o comunidad	1	3
SOCIAL	Aplicabilidad en condiciones artesanales o rurales	2	3
	Disponibilidad local de materiales y diseño	2	3
ECONÓMICA	Costo del digestor	1 (alto costo)	3 (económica)

	Potencial de escalabilidad a mayores volúmenes	2	2
	Presencia o posibilidad de integrar agitación	3	3
	Mantenimiento requerido	2	3
TOTAL		**22**	**32**

4.3.2 Diseño Eléctrico y Sistema de Control del Biodigestor

El diseño eléctrico y de control implementado permitió mantener condiciones operativas estables durante el periodo experimental, así como registrar información relevante para el análisis posterior de resultados. Esta configuración constituye una base técnica adecuada para la validación experimental del biodigestor tipo batch y para su eventual escalamiento hacia sistemas de mayor capacidad y automatización (Tabla 16).

Tabla 16

Componentes y características del diseño eléctrico y sistema de control

Componente / Modelo	Tensión (V)	Potencia (W)	Función	Observación técnica
Ventilador de Celda Peltier TEC1-12706 (referencial)	12	15	Control térmico (calor/frío según montaje)	Requiere disipación forzada en lado caliente
Fuente DC	12	120	Alimentación potencia	Margen 30–40% sobre I del Peltier
Módulo relé DC	5 (control) / 12 (potencia)	—	Conmutación ON/OFF	Contactos ≥ 20–30 A en DC recomendado

Componente / Modelo	Tensión (V)	Potencia (W)	Función	Observación técnica
Disipador + ventilador 12 V	12	3	Disipación lado caliente	Crítico para rendimiento y vida útil
PT100 + MAX31865	5	—	Medición temperatura	Precisión industrial
Arduino Mega PRO / ESP32	5	—	Lógica + registro	Histéresis (evita "clic-clic" del relé)
Aislamiento térmico (espuma 10–20 mm)	—	—	Reducir pérdidas	Baja consumo eléctrico del control

4.3.3. Proceso de Manufactura del Biodigestor Prototipo

El biodigestor prototipo fue fabricado a partir de acero al carbono, siguiendo un proceso de manufactura que incluyó operaciones de rolado, corte, soldadura y ensamblaje de componentes estructurales. La Figura 13 muestra la conformación del cuerpo cilíndrico mediante rolado de lámina metálica, garantizando uniformidad geométrica y resistencia estructural.

Figura 13

Rolado de lámina metálica



Posteriormente, se fabricó el fondo cónico con el objetivo de facilitar la descarga del digestato y evitar la acumulación de sólidos en la base del reactor, como se observa en la Figura 14. La unión entre el cuerpo cilíndrico y el cono inferior se realizó mediante soldadura continua, asegurando hermeticidad y resistencia mecánica.

Figura 14

Fondo cónico para purga



La tapa superior del biodigestor fue diseñada como una placa plana acoplada mediante una brida empernada, lo que permite su desmontaje para labores de mantenimiento, limpieza interna e inspección del sistema (Figura 15). En el centro de la tapa se incorporó un orificio mecanizado destinado al paso del eje del motor de agitación, permitiendo la transmisión del movimiento hacia el interior del biodigestor. Este diseño garantiza un adecuado acoplamiento mecánico, facilita el alineamiento del eje y contribuye a la hermeticidad del sistema durante la operación.

Figura 15

Placa plana acoplada mediante una brida empernada



Finalmente, el biodigestor fue montado sobre una estructura metálica de soporte, diseñada para garantizar estabilidad durante la operación y permitir el acceso a las conexiones inferiores de descarga (Figura 16). El proceso de manufactura permitió obtener un sistema robusto, hermético y funcional, adecuado para la evaluación experimental del rendimiento del biogás a escala laboratorio.

Figura 16

Estructura metálica de soporte

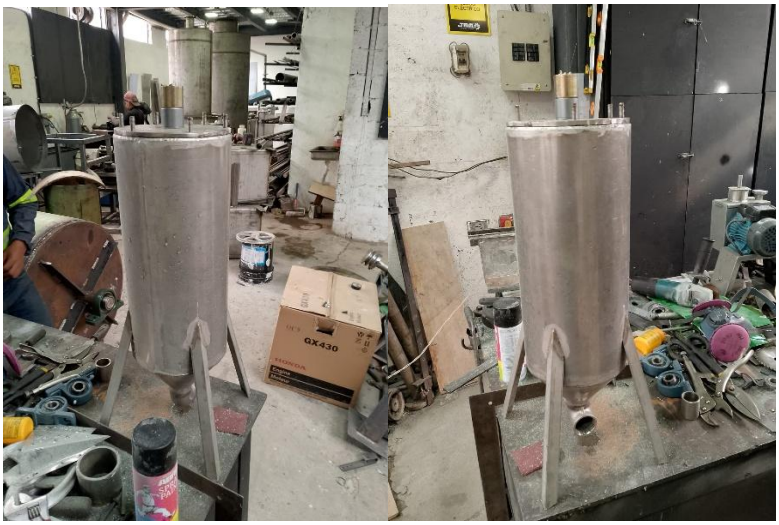


Figura 17

Sistema eléctrico para monitoreo y control



4.4 Sistema de monitoreo en tiempo real mediante aplicación móvil

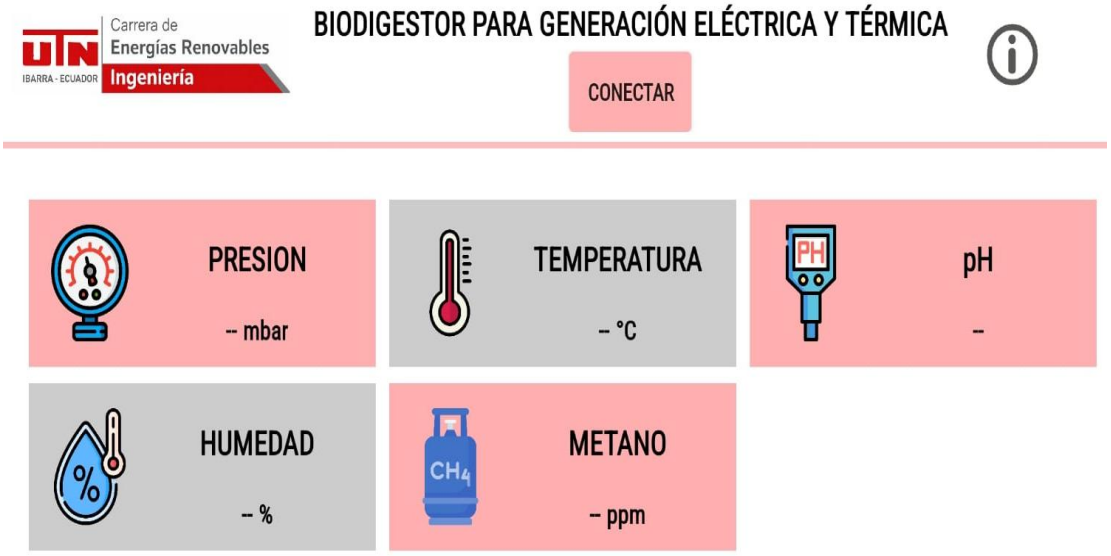
Durante la operación del biodigestor prototipo, se implementó un sistema de adquisición de datos basado en microcontrolador ESP32 (Figura 17), conectado a sensores de temperatura (DS18B20), pH (SEN0169), presión de biogás y composición de gases. Los datos fueron transmitidos vía Wi-Fi a una base de datos en la nube y visualizados en una aplicación móvil desarrollada en entorno MIT App Inventor (Figura 18).

4.4.1 Funcionalidades de la aplicación

- Visualización en tiempo real de temperatura, pH, presión interna y concentración estimada de CH_4.
- Alertas automáticas vía notificación cuando los parámetros salen de los rangos operativos definidos.
- Exportación de datos en formato CSV para su análisis posterior en software estadístico.

Figura 18

Captura de pantalla de la aplicación mostrando las variables controlables en tiempo real



Esta herramienta no solo optimizó la recolección de datos durante el experimento, sino que también sienta las bases para estrategias de digitalización en futuros proyectos de biodigestión en el sector agroindustrial.

4.4.2 Instalación del biodigestor en el laboratorio de energías renovables

Una vez finalizada la construcción del biodigestor se lo instaló en el laboratorio de energías renovables para promover su uso didáctico y profundizar en los conocimientos en el ámbito de la bioenergía (Figura 19).

Figura 19

Ubicación del biodigestor en el laboratorio



4.5 Preparación de mezclas

4.5.1 Preparación y homogenización de las mezclas

La preparación y homogenización de las mezclas se realizó con el objetivo de garantizar condiciones iniciales uniformes y reproducibles para el proceso de digestión anaerobia.

Durante la preparación del sustrato para el biodigestor, se elaboraron las mezclas siguiendo estrictamente la relación 1:1 establecida en la metodología, lo que implica que por cada unidad de masa del residuo fresco se añadió una cantidad equivalente de agua (Tabla 17). Este procedimiento permitió obtener una mezcla con la dilución adecuada para

favorecer la actividad microbiana y asegurar condiciones óptimas de fluidez dentro del reactor.

Tabla 17

Proporción de mezcla y agua utilizada según relación 1:1

Mezcla	Cantidad de residuo [g]	Cantidad de agua añadida [mL]	Relación final
CR + E + S + PTAR	100	12.84	1:1
CR + E	100	10.54	1:1

4.5.2 Composición de las mezclas experimentales

Con base en los criterios de selección de sustratos descritos en el apartado 4.3.1 y en el procedimiento de preparación y homogenización desarrollado en el apartado 4.3.2, se definieron dos mezclas experimentales con composiciones diferenciadas, con el objetivo de evaluar el efecto de la carga nitrogenada y de la relación carbono/nitrógeno sobre la producción y calidad del biogás obtenido mediante digestión anaerobia en un biodigestor tipo batch (Tabla 18).

Tabla 18

Composición cualitativa de las mezclas experimentales evaluadas

Mezclas	Contenido ruminal	Estiércol bovino	Sangre	Lodos PTAR	Agua (1:1)	Característica principal
Mezcla 1	✓	✓	✓	✓	✓	Alta carga nitrogenada
Mezcla 2	✓	✓	X	X	✓	Mezcla base de referencia

La Mezcla 1 fue formulada incorporando contenido ruminal, estiércol bovino, sangre y lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Esta combinación permitió analizar el comportamiento del proceso anaerobio bajo condiciones de alta carga nitrogenada, asociadas a residuos con elevado contenido proteico.

Por otro lado, la Mezcla 2 se constituyó únicamente por contenido ruminal y estiércol bovino, sustratos comúnmente empleados en procesos de digestión anaerobia, y fue considerada como una mezcla de referencia debido a su relación carbono/nitrógeno más cercano al rango óptimo reportado en la literatura.

4.5.3 Carga del biodigestor y condiciones iniciales de operación

Una vez preparadas y homogenizadas las mezclas experimentales, se procedió a la carga del biodigestor en una única etapa, conforme al modo de operación tipo batch. Este esquema operativo permite evaluar el comportamiento integral del sustrato a lo largo de todo el ciclo de digestión anaerobia sin intervenciones posteriores de alimentación o descarga.

La carga se realizó asegurando que el volumen operativo del biodigestor no superara el porcentaje recomendado para este tipo de reactores, dejando un espacio libre destinado a la acumulación del biogás generado. Posteriormente, el reactor fue sellado herméticamente para garantizar condiciones estrictamente anaerobias desde el inicio del proceso.

Previo al inicio de la digestión, se establecieron las condiciones iniciales de operación, incluyendo la temperatura de trabajo en el rango mesofílico, el monitoreo de variables físico-químicas y la activación del sistema de adquisición de datos (Tabla 19). Estas condiciones permitieron asegurar la reproducibilidad del experimento y la comparabilidad entre las mezclas evaluadas.

Tabla 19

Condiciones iniciales de operación

Parámetro	Símbolo	Valor establecido	Unidad	Justificación técnica
Tipo de biodigestor	—	Batch	—	Evaluación comparativa sin alimentación continua
Volumen total del reactor	V_total	8.05	L	Escala laboratorio
Volumen operativo	V_op	5.64	L	Deja espacio para acumulación de biogás
Espacio libre para gas	—	2.41	L	Previene sobrepresión
Relación de dilución	—	1:1 (m/m)	—	Mejora fluidez y transferencia de masa
Temperatura inicial	T_0	35.0	°C	Rango mesofílico óptimo
Rango de operación térmica	T	34.5–35.5	°C	Control ON/OFF con histéresis
pH inicial	pH_0	6.8–7.2	—	Intervalo adecuado para metanogénesis
Presión inicial	P_0	Atmosférica	—	Condición base de referencia

Parámetro	Símbolo	Valor establecido	Unidad	Justificación técnica
Tiempo de retención hidráulica	TRH	15	Días	Digestión batch de residuos orgánicos
Sistema de agitación	—	Previa a la carga	—	Homogeneidad inicial del sustrato
Inicio de monitoreo	—	Inmediato	—	Registro continuo de variables

El establecimiento controlado de las condiciones iniciales de operación permitió minimizar la influencia de variables externas sobre el proceso de digestión anaerobia. La selección del rango mesofílico de operación favorece la actividad de los microorganismos metanogénicos, mientras que el volumen operativo y el espacio libre para gas aseguran un funcionamiento seguro del biodigestor durante todo el periodo experimental. Bajo estas condiciones, las diferencias observadas en la producción y composición del biogás pueden atribuirse principalmente a la composición de las mezclas evaluadas.

4.6 Evaluación del rendimiento de biogás para generación eléctrica y térmica

4.6.1 Variables de análisis de producción de biogás

Mezcla 1. De acuerdo a las condiciones que intervienen en la producción del biogás obtenido a partir del estiércol, sangre, lodos de la PTAR y contenido ruminal, se obtuvieron los siguientes resultados: volumen de la mezcla 5.64 L, relación 1:1 sustrato-agua, pH del sustrato 6.84 (ligeramente acido), temperatura promedio 39.27 ºC, humedad

promedio 92.21 %, presión promedio del biogás 46.97 hPa, tiempo de retención de 15 días y producción (Tabla 20) (Anexo 2).

Tabla 20

Variables en la producción de biogás de la mezcla 1

Variables	Datos
Volumen mezcla	5.64 L
pH	6.84
Temperatura	39.27 ºC
Humedad	92.21 %
Presión	46.97 hPa
Tiempo de retención	15 días

Mezcla 2. De acuerdo a las condiciones que intervienen en la producción del biogás obtenido a partir del estiércol, sangre, lodos de la PTAR y contenido ruminal, se obtuvieron los siguientes resultados: volumen de la mezcla 5.64 L, relación 1:1 sustrato-agua, pH del sustrato 6.92, temperatura promedio 39.22 ºC, humedad promedio 92.24 %, presión promedio del biogás 44.17 hPa, tiempo de retención de 15 días y producción (Tabla 21) (Anexo 3).

Tabla 21

Variables en la producción de biogás de la mezcla 2

Variables	Datos
Volumen mezcla	5.64 L
pH	6.92
Temperatura	39.22 ºC
Humedad	92.24 %
Presión	44.17 hPa
Tiempo de retención	15 días

4.6.2 Análisis estadístico de la producción de biogás

Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en la producción de biogás entre las dos mezclas evaluadas, se realizó un análisis estadístico completo utilizando el software Minitab 17. Se trabajó con tres réplicas independientes por cada mezcla, obteniendo un total de seis unidades experimentales. Las variables analizadas incluyeron el volumen diario de biogás producido, la presión registrada en el headspace del reactor, la temperatura del sustrato y el pH, siendo el volumen acumulado al final de los 15 días la variable respuesta principal para la comparación entre tratamientos.

La estadística descriptiva mostró resultados relevantes. La Mezcla 1 (CR+E+S+PTAR) alcanzó una producción total promedio de 2.606 L, mientras que la Mezcla 2 (CR+E) presentó un promedio ligeramente inferior de 2.566 L. La mayor variabilidad observada en la Mezcla 1 sugiere que la incorporación de sangre y lodos introduce una mayor sensibilidad en el proceso de digestión anaerobia. Por el contrario, la Mezcla 2 mostró una notable consistencia entre sus, evidenciando una mayor estabilidad operacional (Tabla 22).

Tabla 22

Resultado de estadística descriptiva por mezcla

Mezcla	Número de réplicas	Media [L]	Desviación estándar [L]
Mezcla 1	3	2.606	0.039
Mezcla 2	3	2.566	0.004

Previo a la aplicación de pruebas inferenciales, se verificaron los supuestos fundamentales de normalidad y homocedasticidad. La prueba de Shapiro-Wilk arrojó valores p de 0.064 para la Mezcla 1 (Figura 20) y 0.399 para la Mezcla 2 (Figura 21),

ambos superiores al nivel de significancia establecido (α = 0.05), confirmando que los datos de ambas mezclas siguen una distribución normal. La prueba de Levene para igualdad de varianzas mostró un valor p que indica que no existen diferencias significativas entre las varianzas de los dos grupos. Estos resultados validaron el uso de pruebas paramétricas para la comparación de medias.

Figura 20

Prueba de normalidad de la mezcla 1

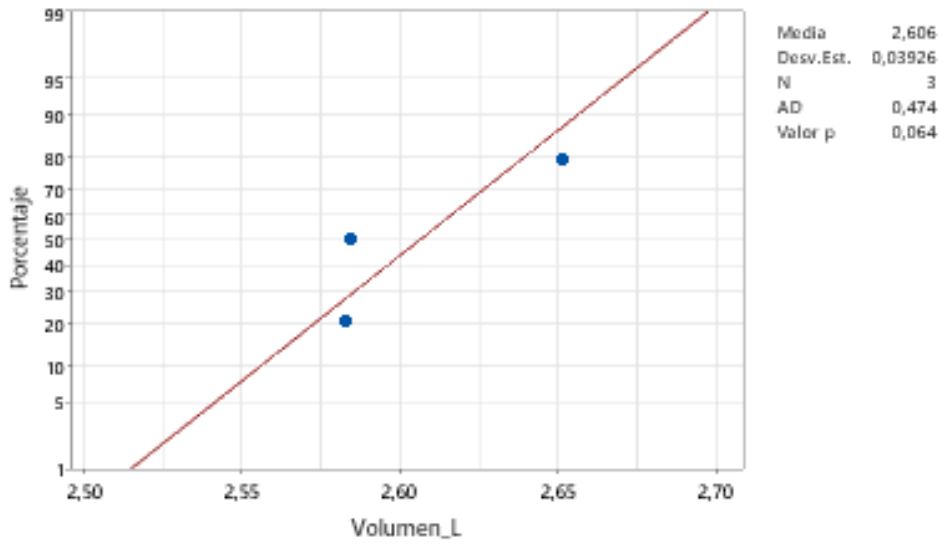
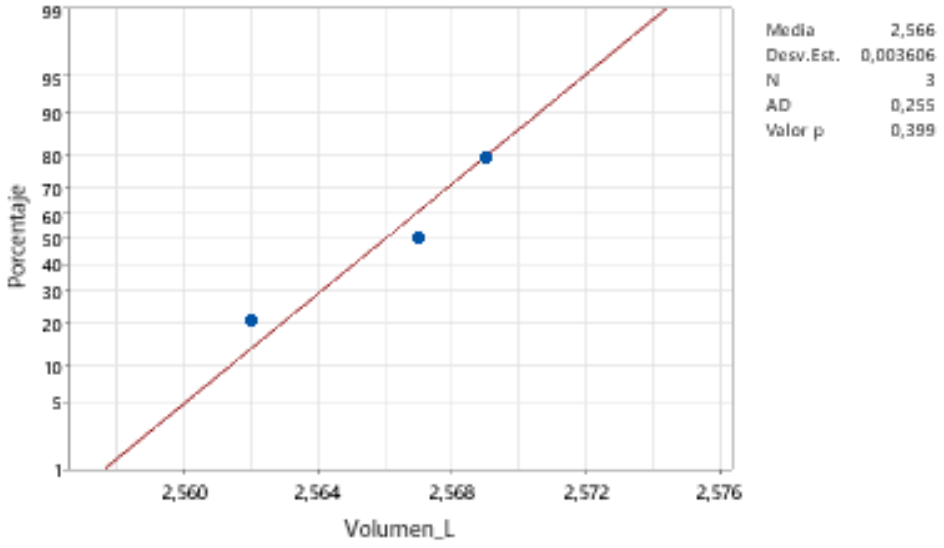


Figura 21

Prueba de normalidad de la mezcla 2

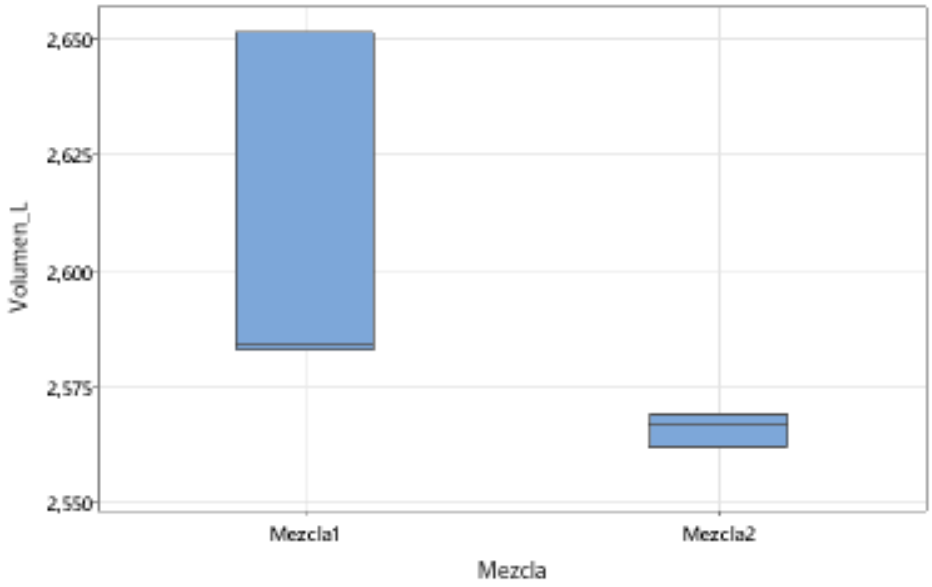


La prueba t para muestras independientes evidenció una diferencia de 40.9 mL entre las medias de las dos mezclas, a favor de la Mezcla 1 (2.606 L vs 2.566 L). Esta diferencia, atribuible al mayor contenido de sólidos volátiles en M1 y a la presencia de sustratos de rápida hidrólisis como la sangre, representa aproximadamente un 1.56% más de producción volumétrica en la Mezcla 1.

La Figura 22 presenta el diagrama de cajas y bigotes para la comparación de volúmenes de biogás entre las dos mezclas evaluadas. En la Mezcla 1 se observa un comportamiento ligeramente más heterogéneo entre réplicas, con valores que oscilan entre 2.583 L y 2.652 L, mientras que la Mezcla 2 presenta valores más concentrados, con un rango de 2.562 L a 2.569 L. La mediana de la Mezcla 1 se ubicó en 2.584 L, mientras que la de la Mezcla 2 fue de 2.567 L. Aunque visualmente las cajas puedan parecer separadas, esta aparente diferencia es un artefacto de la escala del gráfico. La diferencia real entre las medianas es de solo 0.017 L (17 mL), y la diferencia entre las medias es de 0.040 L (40 mL), lo que representa apenas un 1.5% de variación entre tratamientos.

Figura 22

Diagrama de cajas y bigotes para la comparación de volúmenes de biogás



Por el contrario, la Mezcla 2 mostró un comportamiento altamente reproducible entre sus tres réplicas, con valores concentrados en un rango estrecho de 2.562 L a 2.569 L, una mediana de 2.567 L y un rango intercuartílico de tan solo 0.007 L. La desviación estándar de 0.004 L y el coeficiente de variación del 0.14% evidencian una notable estabilidad operacional, atribuible a su relación Carbono/Nitrógeno más equilibrada (13.6:1) y a la ausencia de los sustratos más problemáticos (sangre y lodos), lo que permitió que las bacterias metanogénicas desarrollaran su actividad en condiciones más predecibles.

Si bien la Mezcla 2 (CR+E) demostró ser la opción más estable (CV = 0.14%) y con mejor calidad de biogás (58% CH_4), desde la perspectiva de la gestión integral de residuos, la Mezcla 1 (CR+E+S+PTAR) representa una solución más completa al permitir el aprovechamiento energético del 100% de los residuos generados en la planta, incluyendo sangre y lodos, que son los de mayor potencial contaminante y, por tanto, los que más urge gestionar. A pesar de su mayor variabilidad (CV = 1.50%), la Mezcla 1 produce un 1.56% más de biogás (2.606 L vs 2.566 L) y, al escalarse a la planta real, su potencial energético es superior (0.1022 m^3/día vs 0.1005 m^3/día). Por lo tanto, se selecciona la Mezcla 1 como la alternativa con mayor potencial de valorización de residuos y, consecuentemente, con un mayor impacto ambiental positivo, al reducir la totalidad de los desechos orgánicos enviados a disposición final.

4.6.3 Correlación entre temperatura, pH y producción de biogás

Para evaluar la influencia de los parámetros operativos sobre el rendimiento de biogás, se realizó un análisis de correlación de Pearson utilizando los datos diarios registrados durante los 15 días de operación para ambas mezclas.

Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás. La temperatura se mantuvo controlada en el rango mesofílico (39.8 ± 0.2°C) durante todo el experimento, por lo que su variación fue mínima. En consecuencia, las gráficas de dispersión de temperatura vs producción muestran los datos concentrados en una región muy estrecha, sin una tendencia visual clara. Por esta razón, los resultados de la correlación temperatura-producción se presentan en la Tabla 23, la cual permite una interpretación objetiva y cuantitativa.

Tabla 23

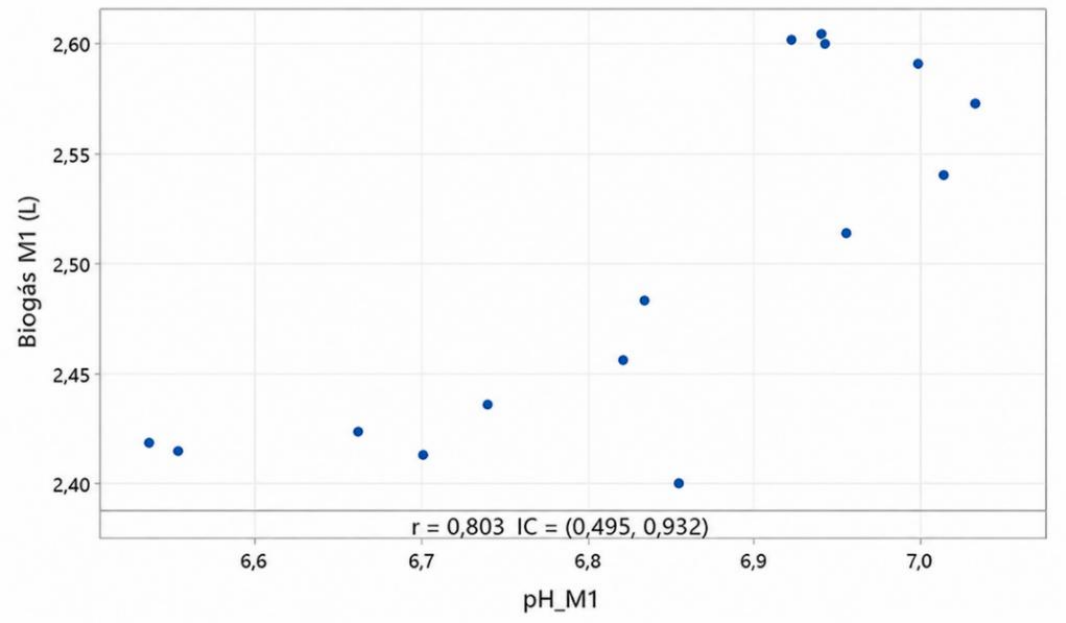
Coeficientes de correlación de Pearson entre variables operativas y producción de biogás.

Variable	Mezcla 1 (CR+E+S+PTAR)	Mezcla 2 (CR+E)	Interpretación
pH vs. Producción	r = 0.803	r = 0.759	El pH influye significativamente en la producción de biogás.
Temperatura vs. Producción	r = 0.435	r = 0.451	La temperatura tuvo una influencia limitada debido al control preciso (39.8 ± 0.2°C) durante el experimento.

Influencia del pH sobre la producción de biogás. El análisis de correlación entre el pH y la producción de biogás mostró diferencias importantes entre las dos mezclas. Para la Mezcla 1 (Figura 23), se obtuvo un coeficiente de r = 0.803, lo que indica una correlación positiva fuerte entre el pH y la producción de biogás. Esto significa que, en la Mezcla 1, la producción de biogás aumentó a medida que el pH se aproximó al rango óptimo (6.8-7.2).

Figura 23

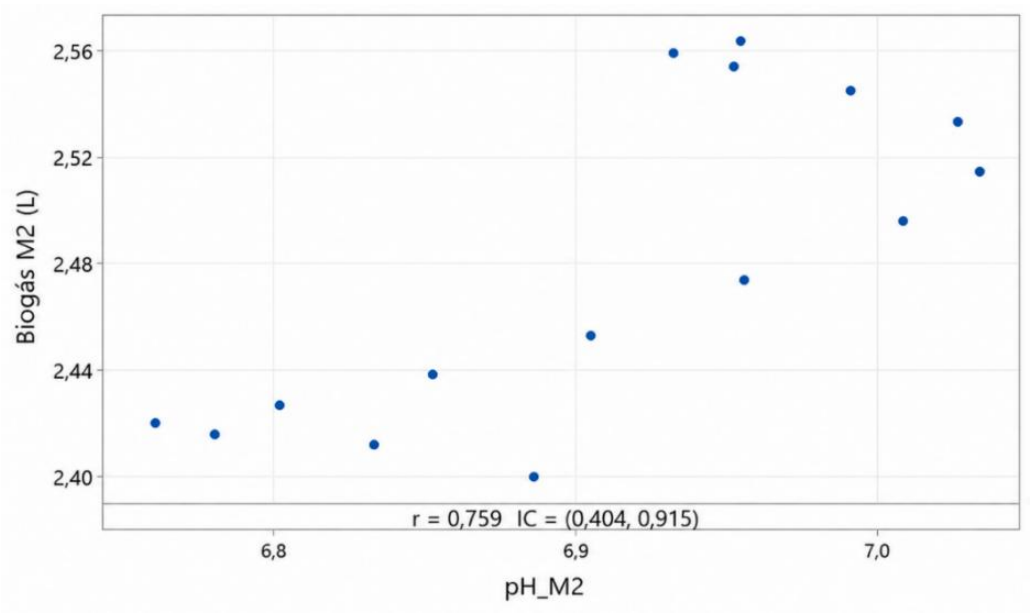
Correlación pH vs rendimiento Mezcla 1



Para la Mezcla 2 (Figura 24), el coeficiente de correlación fue de r = 0.759, indicando una correlación positiva fuerte entre el pH y la producción de biogás. Esto confirma que la Mezcla 2 (CR+E) presenta una mayor estabilidad, atribuible a la presencia de estiércol, que actúa como amortiguador natural del proceso (Mata-Alvarez et al., 2014)

Figura 24

Correlación pH vs rendimiento Mezcla 2

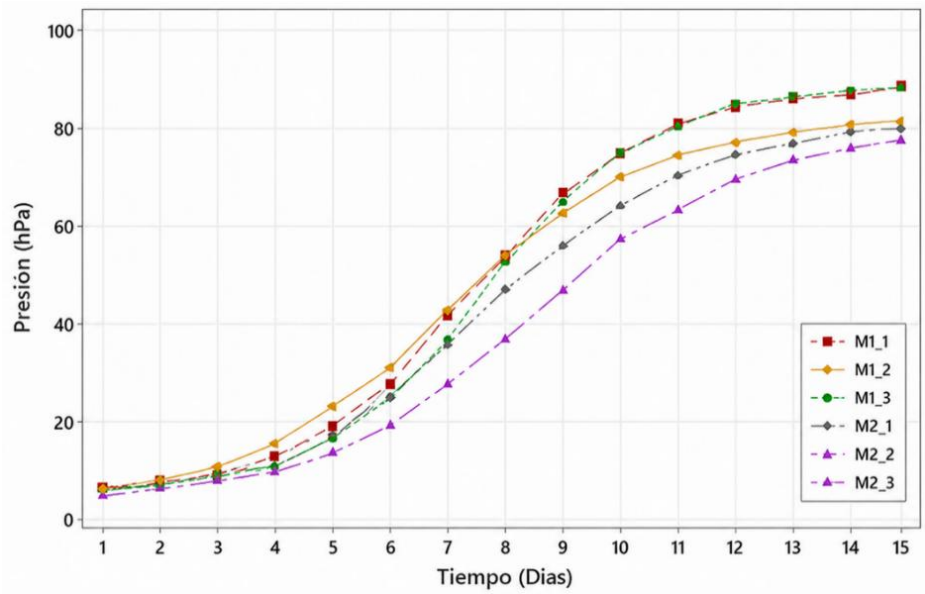


4.6.4 Comportamiento temporal de la producción de biogás

La Figura 25 presenta la evolución de la presión máxima diaria registrada en el headspace del reactor para cada una de las tres réplicas de ambas mezclas a lo largo de los 15 días de operación. En la Mezcla 1 se observa un comportamiento claramente diferenciado entre réplicas, donde una de ellas alcanzó una presión máxima de 98.70 hPa hacia el día 10, mientras que las otras dos réplicas se mantuvieron en rangos inferiores, con presiones máximas de 87.92 y 87.84 hPa respectivamente al final del periodo. Esta divergencia en las trayectorias evidencia la naturaleza sensible de la mezcla que incorpora sangre y lodos, donde pequeñas variaciones en las condiciones iniciales o en el desarrollo del proceso pueden generar respuestas significativamente diferentes en términos de producción de biogás.

Figura 25

Evolución de la presión máxima diaria



4.6.5 Incidencia de la temperatura y el pH sobre la producción de biogás

Los resultados indican que la temperatura se relacionó positivamente y moderadamente con el volumen total de biogás producido (M1: r = 0,.35; M2: r = 0.451). Sin embargo, cuando se incluyen los intervalos de confianza junto al valor cero, esa relación pierde su significado estadístico. Esta conducta ocurrió cuando la temperatura permaneció cerca de los 40 grados centígrados durante casi todo el experimento, es decir, dentro del rango mesofílico visto como correcto para la digestión anaerobia; por consiguiente, las pequeñas variaciones no lograron afectar la generación de biogás.

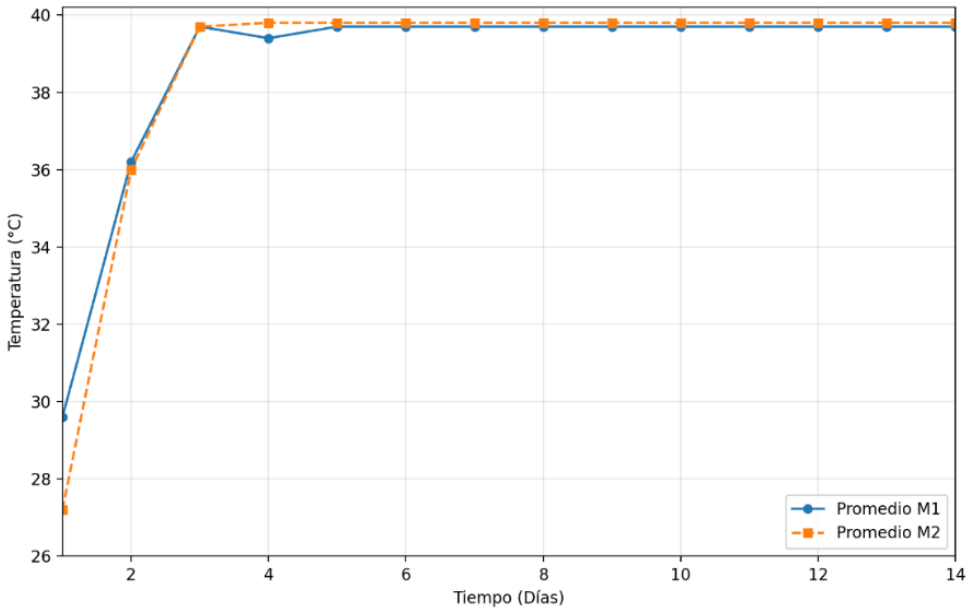
En contraste, el nivel de acidez mostró un vínculo fuerte y directo con la generación de gas metano (M1: r = 0.803; M2: r = 0.759), indicando que cuando dicho valor se movió hacia la zona neutra (6.9 – 7.1), la cantidad total de ese gas aumentaba notablemente. Dichos resultados coinciden con datos anteriores, los cuales demuestran que un entorno cercano a 7 estimula mejor el funcionamiento de microorganismos productores de metano y ayuda a mantener estable toda la reacción de descomposición. Bajo circunstancias específicas de esta investigación, el nivel de acidez fue determinante mucho más que la temperatura al influir en el comportamiento general del sistema analizado

En contraste, las tres réplicas de la Mezcla 2 mostraron trayectorias mucho más homogéneas y consistentes entre sí, con curvas de presión que evolucionaron de manera paralela durante todo el experimento. Las presiones finales alcanzadas por las réplicas de la Mezcla 2 fueron de 77.51, 79.87 y 81.24 hPa, valores notablemente cercanos entre sí. Esta alta reproducibilidad observada en la Mezcla 2 refleja una mayor estabilidad del proceso de digestión anaerobia cuando se utiliza un sustrato más balanceado en términos de la relación Carbono/Nitrógeno (13.6:1), sin los componentes problemáticos asociados a la sangre y los lodos de la planta de tratamiento.

La Figura 26 muestra la evolución de la temperatura del sustrato durante los 15 días de digestión para ambas mezclas. Durante el primer día, la temperatura aumentó controladamente desde temperatura ambiente hasta alcanzar el rango mesofílico (35 - 40°C). A partir del segundo día, el sistema de control térmico mantuvo la temperatura en 39.8 ± 0.2 °C para la Mezcla 1 y 39.9 ± 0.1 °C para la Mezcla 2, con variaciones inferiores a ± 0.5°C durante todo el periodo. Esta estabilidad térmica es fundamental para garantizar la actividad óptima de las bacterias metanogénicas y constituye uno de los logros más importantes del diseño del prototipo, ya que variaciones bruscas de temperatura pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia (Lansing et al., 2008). La capacidad de mantener condiciones isotérmicas durante 15 días consecutivos valida la efectividad del sistema de control implementado en el biodigestor prototipo.

Figura 26

Comportamiento de la temperatura durante el TRH

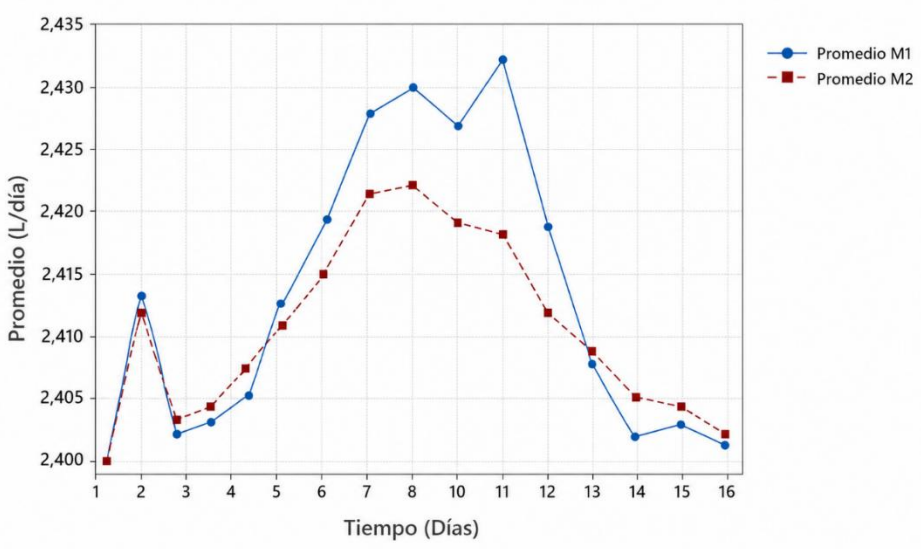


Producción diaria promedio de biogás. La Figura 27 presenta la producción diaria promedio de biogás para cada mezcla durante los 15 días de operación, calculada a partir de las tres réplicas por tratamiento. En esta gráfica se identifican claramente las

cuatro fases características del proceso de digestión anaerobia documentadas en la literatura. La fase lag o de adaptación se extendió durante los primeros 3 días, con producciones promedio inferiores a 3 mL/día para ambas mezclas, periodo durante el cual los microorganismos se aclimataban al sustrato y las bacterias hidrolíticas iniciaban la descomposición de la materia orgánica compleja en compuestos más simples

Figura 27

Producción diaria promedio de biogás



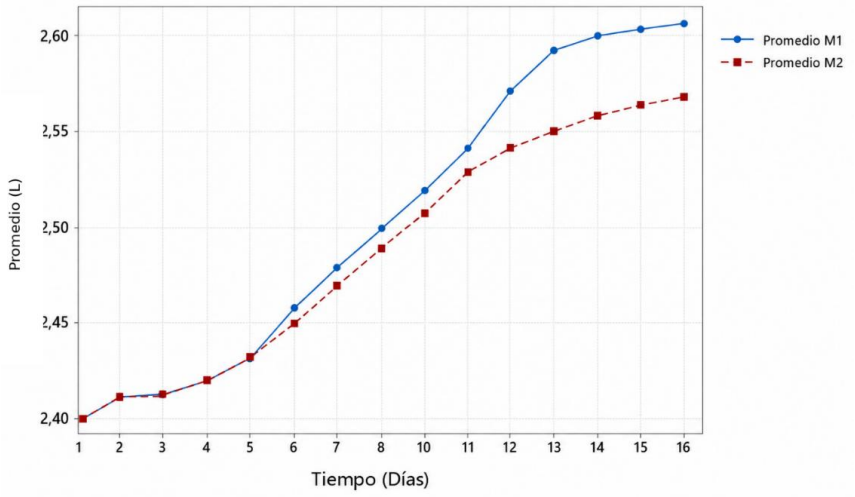
La fase exponencial ocurrió entre los días 4 y 10, donde se registraron los mayores incrementos en la producción diaria. Durante esta fase, la Mezcla 1 alcanzó su pico máximo de producción en el día 10, con 32.21 mL/día, mientras que la Mezcla 2 alcanzó su valor máximo en el día 8, con 21.99 mL/día. Es importante destacar que la Mezcla 1 no solo presentó un pico de producción más alto, sino que también mostró un crecimiento más acelerado durante los días 6 a 10, con un aumento sostenido que sugiere una mayor actividad metanogénica bajo condiciones favorables. Este comportamiento refleja el mayor contenido de sólidos volátiles (79.3%) presentes en la Mezcla 1, los cuales constituyen la fracción orgánica biodegradable que alimenta la producción de biogás.

La fase estacionaria se observó entre los días 11 y 13, caracterizada por una producción sostenida aunque en descenso gradual. Durante esta fase, los valores de producción se mantuvieron relativamente estables, con promedios de 18.64, 8.44 y 1.78 mL/día para la Mezcla 1 en los días 11, 12 y 13 respectivamente, mientras que la Mezcla 2 presentó valores de 11.57, 8.98 y 5.20 mL/día en el mismo periodo. La fase de declive se evidenció a partir del día 14, cuando la producción disminuyó progresivamente hasta valores inferiores a 3 mL/día al final del experimento, indicando el agotamiento del sustrato biodegradable y la consecuente disminución de la actividad microbiana.

La Figura 28 presenta la producción acumulada promedio de biogás para ambas mezclas durante los 15 días de digestión, calculada a partir de la suma de los volúmenes diarios de las tres réplicas por tratamiento. Esta curva de acumulación es particularmente relevante desde el punto de vista energético, ya que representa el volumen total de biogás disponible para ser aprovechado en aplicaciones de generación eléctrica y térmica. La Mezcla 1 alcanzó un volumen acumulado promedio de 2.606 L al final del periodo, mientras que la Mezcla 2 alcanzó 2.566 L. Esta diferencia tiene relevancia práctica al tratarse de una diferencia de 40 mL entre ambas formulaciones.

Figura 28

Producción acumulada promedio de biogás



La forma sigmoidal característica de ambas curvas de acumulación confirma que el proceso de digestión anaerobia se desarrolló adecuadamente en ambos tratamientos, siguiendo el patrón típico reportado en la literatura para sistemas batch.

4.6.6 Producción total de biogás

La producción total de biogás se determinó a lo largo de todo el periodo de digestión anaerobia para cada una de las mezclas evaluadas. Los resultados corresponden al volumen acumulado generado durante el ciclo batch, permitiendo comparar el rendimiento global del proceso en función de la composición del sustrato (Tabla 24).

Tabla 24

Volumen total de biogás producido por mezcla

Mezcla	Volumen de biogás acumulado [L]	Tiempo de digestión [días]	Producción promedio diaria [L/día]
CR+E+S+PTAR	2.606	15	0.1737
CR+E	2.566	15	0.1711

La Mezcla 1 presentó una mayor producción total de biogás, a pesar de que la mezcla 2 tiene una relación C/N más equilibrada y a una menor carga nitrogenada, condiciones que favorecen la estabilidad del proceso anaerobio.

4.6.7 Composición del biogás obtenido

La composición del biogás se estimó a partir de las lecturas promedio de los sensores instalados en el sistema, durante la fase estable de producción (Tabla 25).

Tabla 25

Composición porcentual promedio del biogás

Componente	Mezcla 1 [%]	Mezcla 2 [%]
Metano (CH_4)	52	58
Dióxido de carbono (CO_2)	42	38
Componente	**Mezcla 1 [%]**	**Mezcla 2 [%]**
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	0.3	0.1
Vapor de agua (H_2O)	5.5	3.5
Otros (N_2, O_2, trazas)	0.2	0.4
Total	**100**	**100**

La mayor fracción de metano en la Mezcla 2 confirma que una relación C/N adecuada no solo incrementa la cantidad de biogás producido, sino también su calidad energética.

4.6.8 Potencial energético del biogás (Mezcla 1)

A partir del volumen de biogás producido experimentalmente, se estimó el potencial energético total, eléctrico y térmico de la Mezcla 1, considerando un contenido de metano del 52% y un poder calorífico inferior del metano de 9.97 kWh/m³ (Tabla 26).

Tabla 26

Energía térmica y eléctrica estimada por mezcla

Mezcla	Biogás [m³/día]	CH_4 [%]	PCI [k Wh/m³]	Energía Eléctrica [kWh]	Energía Térmica [kWh]
CR+E+S+PTAR	0.002606	52	5.18	0.00407	0.00611

A partir del volumen de biogás producido y considerando valores de concentración de metano reportados en la literatura para sustratos con características similares (52% CH_4 para la Mezcla 1; 58% CH_4 para la Mezcla 2), se estimó el potencial energético térmico y eléctrico de cada mezcla. El poder calorífico inferior (PCI) del biogás resultante fue de 5.18 kWh/m^3 para la Mezcla 1, reflejando la mayor calidad energética de esta última debido a su relación C/N más equilibrada (13.6:1).

Considerando una eficiencia de conversión eléctrica del 30% y térmica del 45%, típica de pequeños sistemas de cogeneración, la energía eléctrica estimada fue de 0.00407 kWh para la Mezcla 1, mientras que la energía térmica estimada fue de 0.00611 kWh.

4.6.9 Escalado teórico y dimensionamiento de un biodigestor a escala real

El escalado de los resultados experimentales a escala real se realizó mediante un método de proporcionalidad lineal directa, asumiendo que la producción de biogás es directamente proporcional a la masa de sustrato alimentado. Esta aproximación es ampliamente utilizada en estudios de prefactibilidad de plantas de biogás a pequeña escala (Alarcón, 2016; Justine et al., 2024).

Los experimentos con la Mezcla 1 mostraron que 5.6 kg de sustrato generaron 2.606 L de biogás, lo que se traduce en un rendimiento de 0.465 L de biogás por kg de sustrato. Con un contenido de metano del 52%, el rendimiento específico de metano es de 0.0242 L CH_4/kg de sustrato. Aplicando este rendimiento a la disponibilidad diaria real de la planta (257.13 kg/día de todos los residuos), se obtienen las siguientes estimaciones de producción a escala real que se presentan en la tabla 27.

Tabla 27

Estimación de producción de biogás y energía a escala real

Parámetro	Valor diario	Valor anual
Producción de Biogás	0.1197 m^3/día	43.67 m^3/año
Producción de metano (52%)	0.0622 m^3 CH_4/día	22.71 m^3 CH_4/año
Energía eléctrica generada (30% eficiencia)	0.186 kWh/día	67.9 kWh/año
Energía térmica generada (45% eficiencia)	0.279 kWh/día	101.8 kWh/año
Energía total en el biogás	0.620 kWh/día	226.44 kWh/año

Considerando el consumo eléctrico anual reportado por la planta (81980.67 kWh/año), la cobertura anual sería del 0.071%, equivalente a 58.0 kWh/año. Este valor, aunque reducido, es comparable con los reportados en estudios de prefactibilidad para plantas de faenamiento de pequeña escala en desarrollo.

Los resultados experimentales se obtuvieron utilizando un biodigestor tipo batch con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 15 días, el cual demostró ser adecuado para la digestión de los residuos de faenamiento a escala laboratorio. Si se optara por una configuración batch a escala real, el dimensionamiento sería el siguiente:

Dimensionamiento del biodigestor. Para procesar los 257.13 kg/día de sustrato (con una densidad aproximada de 1 kg/L y relación agua:residuo 1:1), se requiere un volumen operativo de aproximadamente 257 L/día. Considerando un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 15 días, el volumen mínimo del digestor se calcula como (Ecuación 26):

$$V_{digestor} = CargadiariaxTRH \qquad (Ec. 26)$$

$$V_{digestor} = 0.26m^3 \; x \; 15 \; días = 3.9m^3$$

Adicionalmente, debe considerarse un 30% de espacio de cabeza (headspace) para acumulación de biogás, resultando en un volumen total recomendado de (Ecuación 20, p. 34):

$$V_{total} = \frac{3.9m^3}{0.7} \approx 5.57m^3$$

Por lo tanto, si se mantuviera la configuración batch utilizada en el experimento, se recomendaría (Tabla 28):

Tabla 28

Configuración batch recomendada

Concepto	Especificación
Tipo de biodigestor	Batch (carga única por ciclo)
Número de unidades	2 digestores en paralelo de 3 m³ cada uno
Volumen total	6 m³ (2 × 3 m³)
TRH por ciclo	15 días
Frecuencia de carga	Cada 15 días (alternando unidades)
Carga por ciclo	257.13 kg de residuos + agua por digestor

Esta configuración en paralelo permite que mientras un digestor está en fase de digestión (15 días), el otro pueda ser descargado y preparado para un nuevo ciclo, logrando una operación semi-continua (Martina et al., 2005a; Ripoll et al., 2023).

Consideraciones para el escalado. La selección del tipo de biodigestor para una implementación a escala real debe basarse en la literatura especializada sobre tratamiento

de residuos de matadero. Estudios recientes indican que las configuraciones más utilizadas y exitosas en plantas de faenamiento son los reactores continuos de tanque agitado (CSTR) y los reactores batch secuenciales anaerobios (AnSBR) (Costa, 2026). Para el caso específico de la Planta de Antonio Ante, considerando la disponibilidad de sustrato (257.13 kg/día) y los resultados experimentales de este estudio, se recomienda una configuración híbrida que integre ambas tecnologías (Tabla 29) (Costa, 2026; Ripoll et al., 2023).

Tabla 29

Tecnologías de biodigestión recomendadas para plantas de faenamiento

Tipo de residuo	Tecnología recomendada	Justificación
Fracción sólida (CR + E)	CSTR (Reactor Continuo de Tanque Agitado)	Opera con alta carga orgánica, produce biogás continuo y estable, y es la tecnología más reportada para residuos sólidos de matadero(Costa, 2026; López-Escobar et al., 2014)
Fracción líquida (Sangre + lodos PTAR)	UASB (Reactor de Flujo Ascendente con Manto de Lodos)	Trata eficientemente efluentes líquidos, reduciendo la carga contaminante antes del vertido (Costa, 2026)

Corrección por escala. Es importante señalar que el escalado de laboratorio a escala industrial no es perfectamente lineal, siendo recomendable aplicar un factor de corrección para obtener una estimación más realista mediante la Ecuación 21, p. 35.

Aplicando un factor conservador de BMPCC = 0.85 a la producción estimada de biogás, se obtiene una producción real esperada corregida. Para la producción de biogás estimada en este estudio, el cálculo es (Ecuación 22, p. 35):

$$V_{real} = 0.1197 \frac{m^3}{día} \; x \; 0.85 = \; 0.1017 \frac{m^3}{día}$$

Esta producción corregida de biogás (0.0102 m³/día) se traduce en una generación eléctrica y térmica corregida, calculada de la siguiente manera Tabla 30 (Ecuación 23 y 24, p. 35):

$$E_{eléctrica} = 0.1017 \frac{m^3}{día} \; x \; 0.52 \; x \; 9.97 \frac{kWh}{m^3} \; x \; 0.30 = 0.158 \; \frac{kWh}{m^3}$$

$$E_{térmica} = 0.1017 \frac{m^3}{día} \; x \; 0.52 \; x \; 9.97 \frac{kWh}{m^3} \; x \; 0.45 = 0.237 \; \frac{kWh}{m^3}$$

Donde:

V_{real}: Producción de biogás corregida (m³/día)

$\%CH_4$: Concentración de metano (52% = 0.52)

PCI_{CH_4}: Poder calorífico inferior del metano (9.97 kWh/m³)

$\eta_{eléctrica}$: Eficiencia de conversión eléctrica (30% = 0.30)

$\eta_{térmica}$: Eficiencia de conversión térmica (45% = 0.45)

Tabla 30

Producción de biogás y energía a escala real (BMPCC = 0.85)

Parámetro	**Valor diario**	**Valor anual**
Producción de biogás	0.1017 m³/día	37.12 m³/año
Producción de metano (52%)	0.0529 m³ CH_4/día	19.30 m³ CH_4/año
Energía total en el biogás	0.527 kWh/día	192.5 kWh/año

Energía eléctrica generada (30% eficiencia)	0.158 kWh/día	57.7 kWh/año
Energía térmica generada (45% eficiencia)	0.237 kWh/día	86.6 kWh/año
Cobertura del consumo eléctrico de la planta	—	0.071%

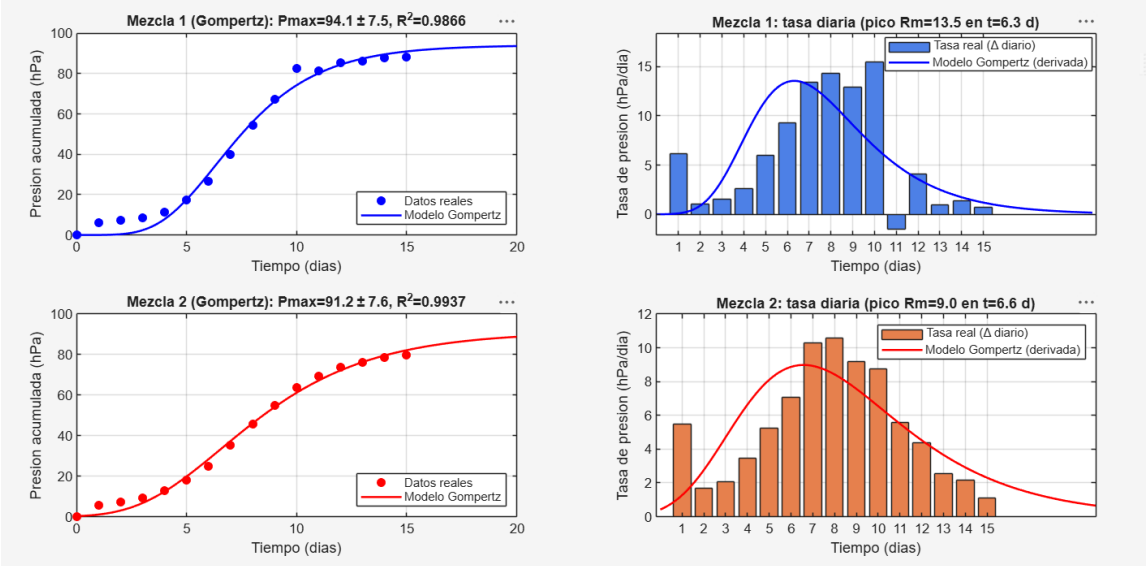
4.6.10 Modelado dinámico de la producción de biogás

Para comprender a fondo la cinética del proceso de digestión anaerobia y poder predecir su comportamiento, se aplicaron dos enfoques de modelado complementarios. Primero, se utilizó un modelo cinético no lineal para describir la producción acumulada de biogás. Segundo, se emplearon modelos de funciones de transferencia para capturar la dinámica temporal del sistema, relacionando variables de entrada con la producción de biogás.

Cinética de producción de biogás mediante el modelo de Gompertz. La cinética de producción de biogás fue modelada mediante la ecuación de Gompertz modificada, utilizando el volumen neto de biogás calculado a partir de los registros experimentales de presión y temperatura mediante la ley de los gases ideales. Los parámetros cinéticos obtenidos para ambas mezclas se presentan en la Figura 29. (Lay et al., 1997; Zwieteringet al., 1990)

Figura 29

Ajuste del modelo de Gompertz de producción y tasa diaria para las Mezclas 1 y 2

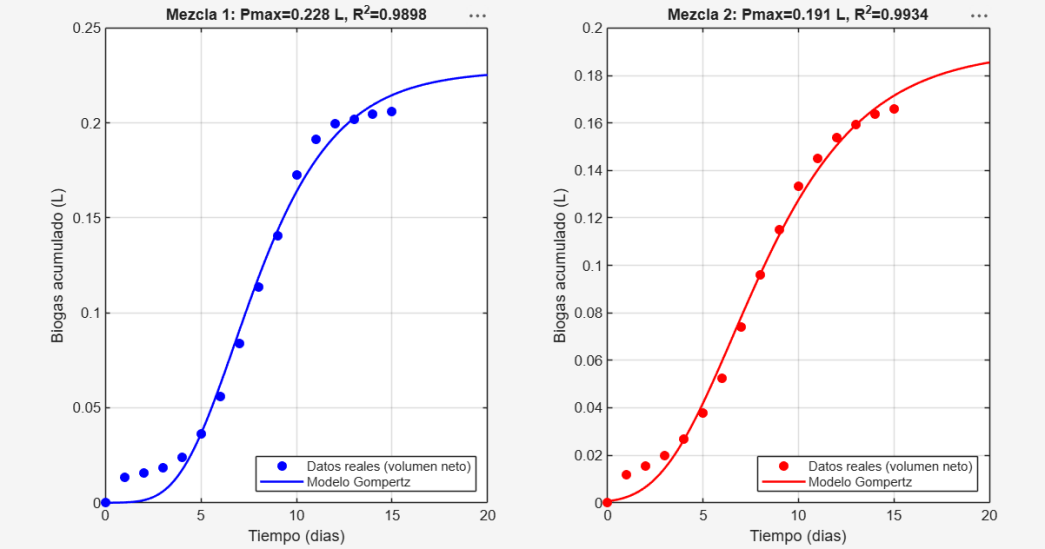


En presión, la Mezcla 1 presentó un potencial máximo de producción Pmax de 94.1 ± 7.5 hPa, una velocidad máxima de producción Rm de 13.5 hPa d^{-1} y un tiempo de latencia (λ) de 3.76 días, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9866$. La Mezcla 2 registró un Pmax de 91.2 ± 7.6 hPa, una Rm de 9.0 hPa d^{-1} y una (λ) de 2.84 días, con un $R^2 = 0.9937$.

Con el fin de presentar la producción real de biogás generada durante el proceso, los datos de presión fueron transformados a volumen (L) mediante la ley de los gases ideales. La Figura 30 muestra la producción acumulada de biogas para ambas mezclas y el ajuste obtenido con el modelo de Gompertz modificado, permitiendo describir el comportamiento cinético observado a lo largo del periodo experimental.

Figura 30

Producción acumulada de biogás en volumen (L)



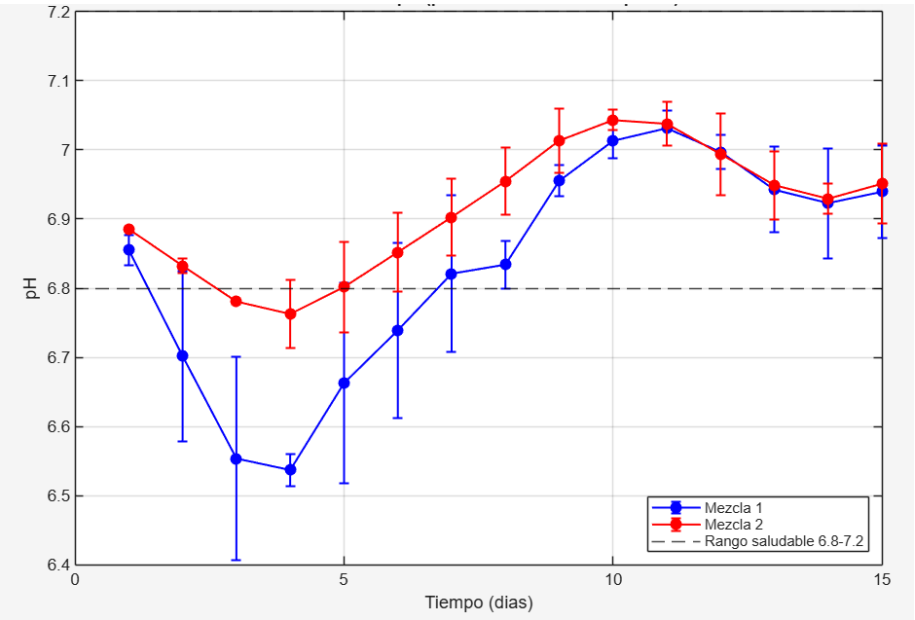
Al expresar la producción en volumen de biogás, la Mezcla 1 alcanzó un Pmax de 0.228 L, una Rm de 0.0288 L d^{-1} y un (λ) de 3.85 días, R^2 = 0.9898, mientras que la Mezcla 2 presentó valores de 0.191 L, 0.0186 L d^{-1} y 2.79 días, respectivamente, R^2 = 0.9934. En ambos casos, el modelo presentó coeficientes de determinación superiores a 0.98, indicando un adecuado ajuste a los datos experimentales.

La comparación entre modelos de Gompertz y el modelo cinético de primer orden mediante el criterio de información de Akaike (AIC) mostró valores de 50.14 y 85.78 para la Mezcla 1, y de 32.76 y 75.77 para la Mezcla 2, respectivamente obteniendo diferencias (AIC) de 35.64 y 43.01 a favor del modelo de Gompertz (Burnham, 2002).

Estabilidad del proceso mediante el seguimiento del pH. La evolución del pH durante los quince días de operación se muestra en la Figura 31. En ambas mezclas se observó una disminución de pH durante los primeros días de la experimentación, seguida de una recuperación progresiva hasta los valores cercanos a la neutralidad.

Figura 31

Evolución del pH promedio ± de las 3 réplicas

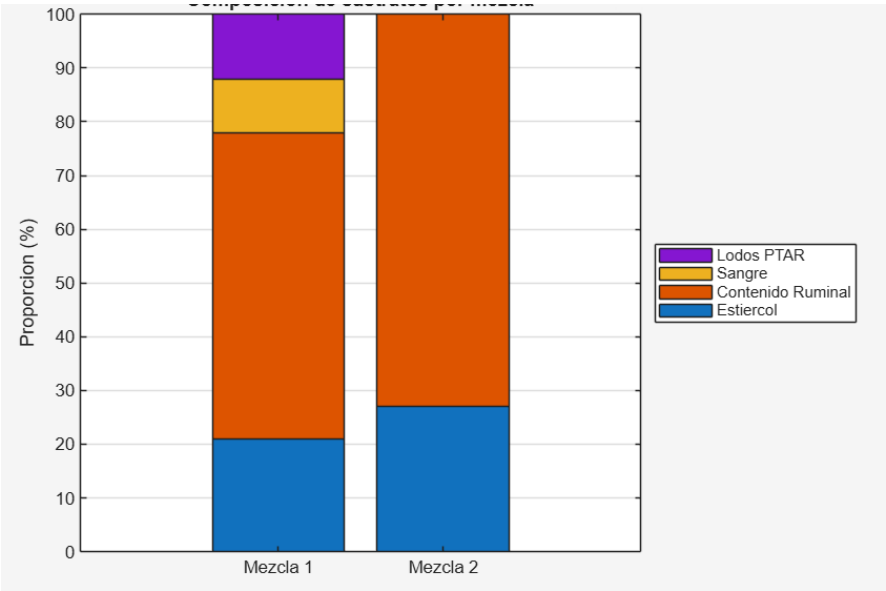


La Mezcla 1 registró un valor mínimo de 6.537 entre los días 2 y 5, mientras que la Mezcla 2 presentó un valor mínimo de 6.763 en el mismo periodo. Al finalizar el ensayo, los valores de pH fueron de 6.939 para la Mezcla 1 y 6.951 para la Mezcla 2. Estos valores se mantuvieron próximos al intervalo óptimo reportado para la digestión anaerobia (6.8-7.2) (Appels et al., 2008; Ward et al., 2008).

Influencia de la composición de las mezclas sobre la producción de biogás. Las proporciones de sustratos utilizadas en cada tratamiento se presentan en la Figura 32. La Mezcla 1 estuvo conformada por 21% de estiércol, 57% de contenido ruminal, 10% de sangre y 12% de los PTAR, mientras la Mezcla 2 estuvo integrada por 27% de estiércol y 73% de contenido ruminal.

Figura 32

Composición de sustratos por mezcla



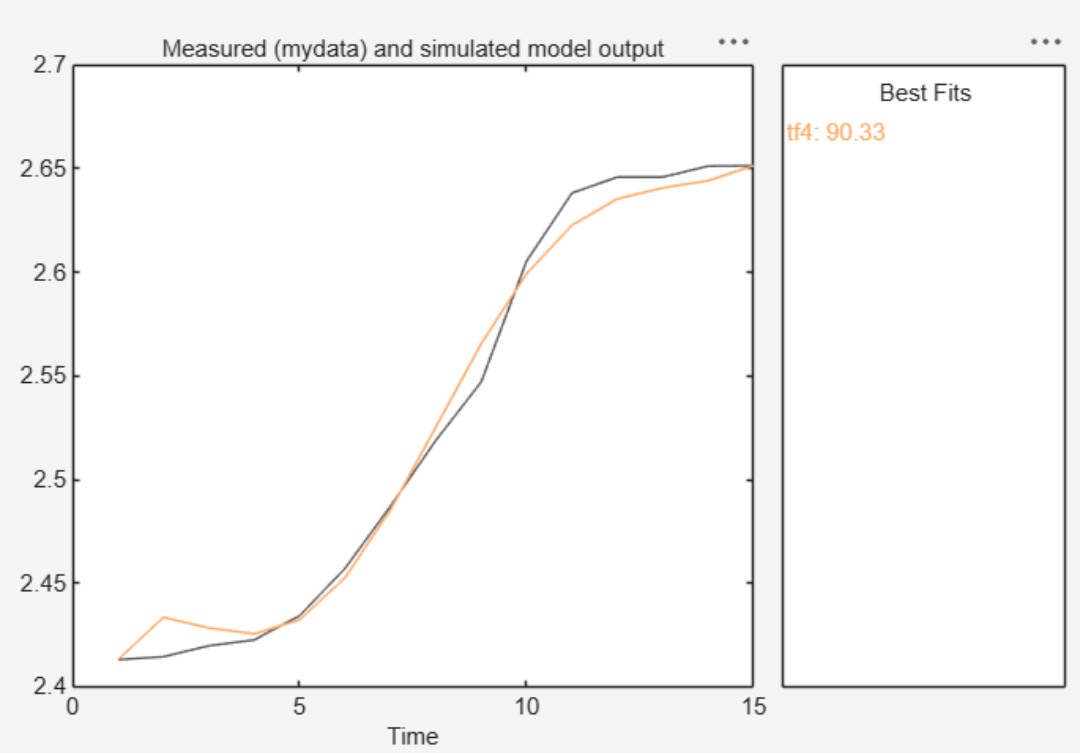
Los parámetros cinéticos obtenidos mediante el modelo de Gompertz mostraron valores superiores de Pmax y Rm para la Mezcla 1 con respecto a la Mezcla 2. Asimismo, la producción acumulada al finalizar el ensayo fue mayor en la Mezcla 1.

Modelado dinámico mediante funciones de transferencia. Para la Mezcla 1, se desarrollaron modelos de función de transferencia para las tres réplicas experimentales, con el objetivo de evaluar la consistencia y reproducibilidad del comportamiento dinámico del sistema cuando se incorporan sustratos de alta carga nitrogenada (sangre y lodos). El modelo de función de transferencia de tercer orden continuo para la primera réplica se define mediante la Ecuación 27:

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{2.353s^3 - 1.399s^2 + 0.703s + 0.04234}{s^3 + 5.974s^2 + 0.8208s + 2.093} \qquad (Ec.27)$$

Figura 33

Validación del modelo de función de transferencia para la Réplica 1 de la Mezcla 1



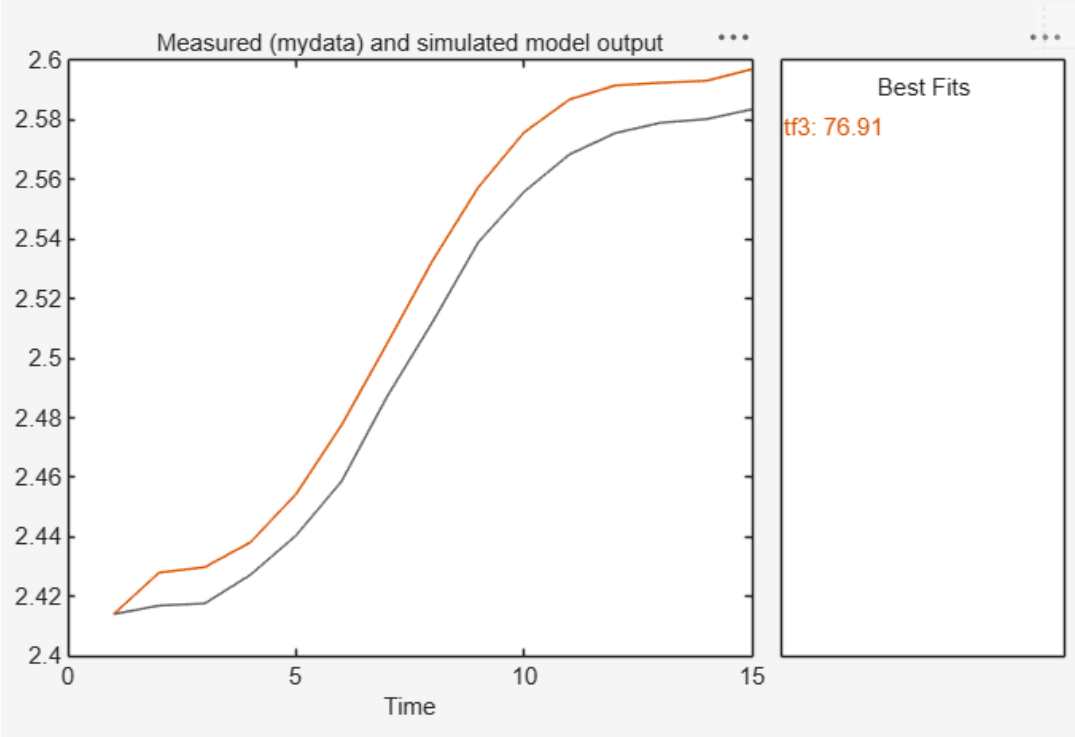
Como se observa en la figura 33 de validación temporal, la respuesta simulada por el modelo lineal naranja sigue de cerca la trayectoria de los datos medidos en el sistema real lineal gris. El modelo alcanza un Best Fit del 90.33%, lo que demuestra un alto nivel de precisión para presentar la respuesta transitoria y estacionaria del proceso bajo estudio.

El modelo de función de transferencia para la segunda réplica se presenta en la Ecuación 28:

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{2.423s^3 + 0.09143s^2 + 0.6699s + 0.02374}{s^3 + 6.217s^2 + 0.4342s + 1.729} \qquad (Ec. 28)$$

Figura 34

Validación del modelo de función de transferencia para la Réplica 2 de la Mezcla 1



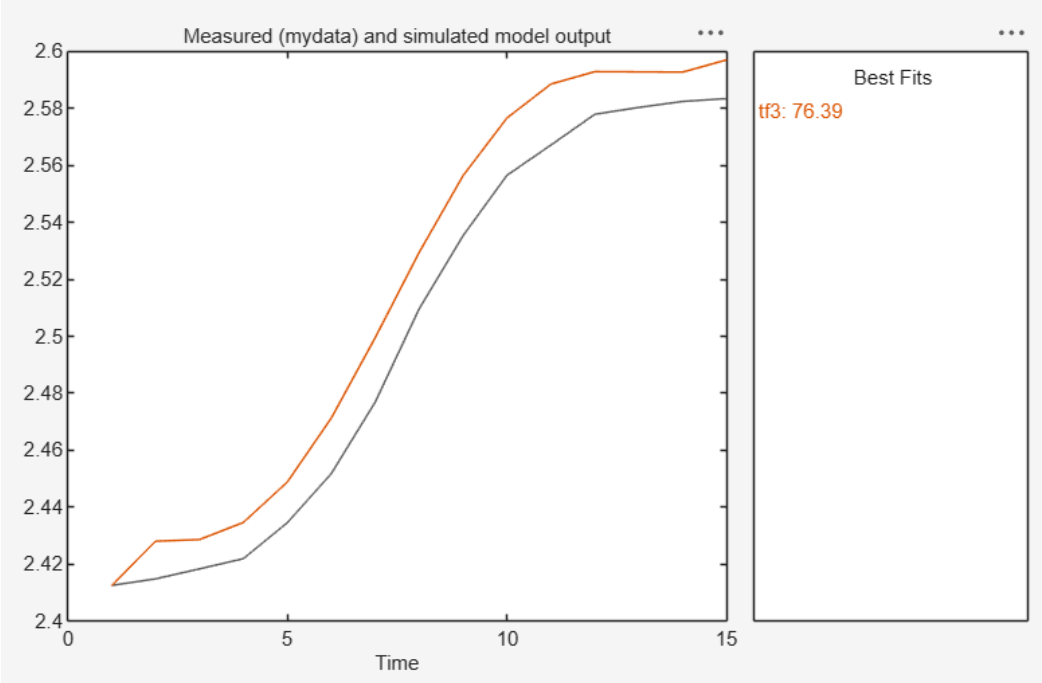
En la Figura 34 se observa que el modelo de tercer orden para la segunda réplica alcanza un Best Fit del 76.91% . Este ajuste, aunque ligeramente inferior al de la primera réplica, sigue siendo aceptable para representar la dinámica del proceso. La variación en el ajuste entre réplicas evidencia la mayor sensibilidad de la Mezcla 1 a pequeñas diferencias en las condiciones experimentales, lo cual es consistente con el coeficiente de variación (CV = 1.50%) y la mayor dispersión observada en los resultados de producción de biogás para esta mezcla.

El modelo de función de transferencia para la tercera réplica se presenta en la Ecuación 29:

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{2.411s^3 + 0.02335s^2 + 0.7164s + 0.02055}{s^3 + 4.569s^2 + 0.3319s + 1.414} \qquad (Ec. 29)$$

Figura 35

Validación del modelo de función de transferencia para la Réplica 3 de la Mezcla 1



En la Figura 35 se observa que el modelo de tercer orden para la tercera réplica alcanza un Best Fit del 76.39%. Este valor es muy similar al obtenido para la segunda réplica (76.91%), lo que sugiere que ambas réplicas presentan un comportamiento dinámico comparable y confirmando una vez más la estabilidad del proceso.

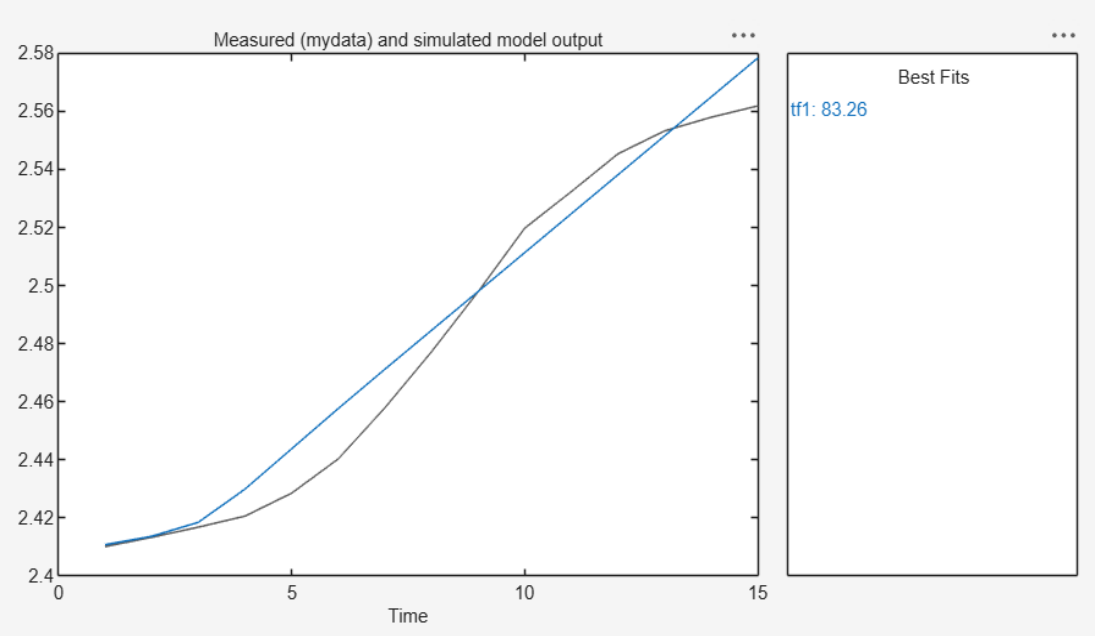
Para la Mezcla 2 (contenido ruminal y estiércol), se desarrollaron modelos de función de transferencia para las tres réplicas experimentales, con el objetivo de evaluar la consistencia del comportamiento dinámico del sistema cuando se utiliza un sustrato más estable y con una relación C/N más equilibrada (13.6:1).

Para fines de control, donde la simplicidad del modelo es prioritaria, se evaluó un modelo de primer orden para la primera réplica la cual se presenta en la Ecuación 30:

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{5.55s + 0.02616}{s^2 + 1.929s + 1.95} \qquad (Ec. 30)$$

Figura 36

Validación del modelo de función de transferencia de tercer orden para la Réplica 1 de la Mezcla 2



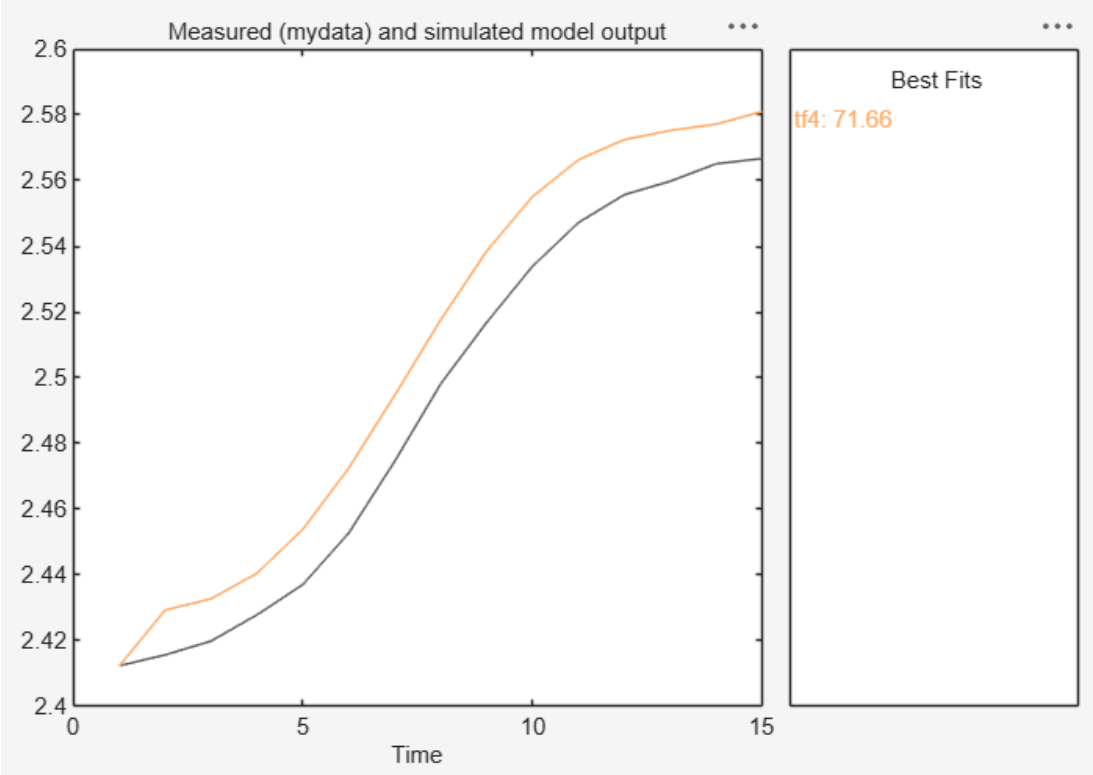
En la Figura 36 se observa que el modelo de primer orden alcanza un Best Fit del 83.26%. Este resultado es particularmente relevante, ya que demuestra que, para la Mezcla 2, un modelo de orden reducido es suficiente para representar adecuadamente la dinámica del sistema, con la ventaja adicional de ser más sencillo de implementar en sistemas de control. La simplicidad del modelo de primer orden lo hace preferible para aplicaciones de control PID o predictivo, donde la estabilidad y la rapidez de respuesta son fundamentales.

El modelo de tercer orden para la segunda réplica se presenta en la Ecuación 31:

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{2.41s^3 + 0.04508s^2 + 0.6453s + 0.01566}{s^3 + 4.709s^2 + 0.3336s + 1.28} \qquad (Ec. 31)$$

Figura 37

Validación del modelo de función de transferencia de tercer orden para la Réplica 2 de la Mezcla 2



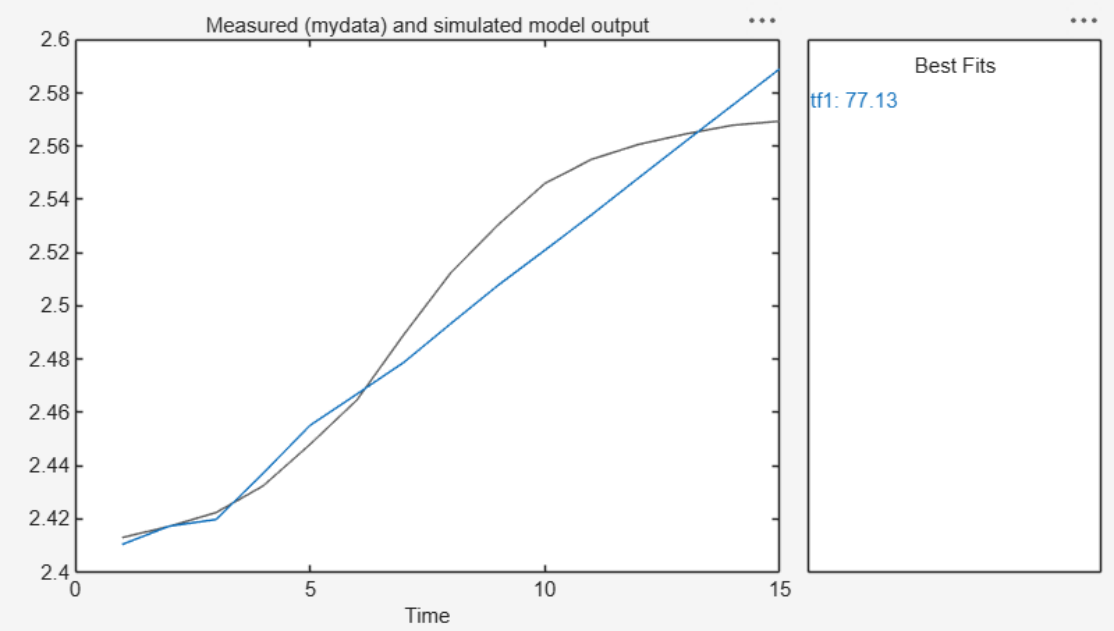
Como se observa en la Figura 37, el modelo de tercer orden alcanza un Best Fit del 71.66%. Este ajuste, aunque moderado, permite capturar la dinámica completa del sistema, incluyendo las respuestas transitorias.

El modelo de primer orden para la tercera réplica se presenta en la Ecuación 32:

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{8.97s + 0.0386}{s^2 + 0.8629s + 2.83} \qquad (Ec. 32)$$

Figura 38

Validación del modelo de función de transferencia de primer orden para la Réplica 3 de la Mezcla 2



En la Figura 38 se observa que el modelo de primer orden para la tercer réplica alcanza un Best Fit del 77.13%. Este valor, aunque ligeramente inferior al obtenido para la primera réplica (83.26%), sigue siendo adecuado para representar la dinámica del sistema con una estructura simplificada.

La Tabla 31 presenta un resumen de los valores de Best Fit obtenidos para los modelos de función de transferencia de cada réplica y mezcla evaluada.

Tabla 31

Resumen de Best Fit (%) obtenidos para los modelos de función de transferencia

Mezcla	**Réplica**	**Best Fit (%)**
Mezcla 1 (CR+E+S+PTAR)	Réplica 1	90.33
	Réplica 2	76.91
	Réplica 3	76.39
	Promedio Mezcla 1	**81.21**
Mezcla 2 (CR+E)	Réplica 1	83.26
	Réplica 1	71.66
	Réplica 2	77.13
	Promedio Mezcla 2	**77.35**

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los resultados de la caracterización físico-química demuestran que las mezclas de los residuos orgánicos generados en la Planta de Faenamiento de Antonio Ante poseen un alto contenido de humedad con valores superiores al 85%. El análisis de ST reveló valores entre 10.54 % y 12.85 % para las mezclas evaluadas, situándose dentro del rango óptimo (10 – 15 %). Se determinó un alto potencial metanogénico por el contenido de sólidos volátiles con un porcentaje superior al 75 % y Se confirmó que la mezcla 2 (CR + E) presenta una relación C/N (13:1) más próxima a los rangos adecuados para la degradación microbiana.
- En cuanto a la construcción del biodigestor prototipo, se logró diseñar y fabricar un sistema tipo batch de 8.05 L operativos, construido en acero inoxidable con espesor de 2 mm, que incorpora un sistema de control térmico con banda calefactora de 100 W y sensor PT100, un sistema de agitación mecánica, y una instrumentación completa basada en ESP32/Arduino para monitoreo en tiempo real de presión, temperatura, pH y humedad. La integración de una aplicación móvil desarrollada en MIT App Inventor permitió la visualización remota de variables y la exportación de datos en formato CSV, constituyendo un aporte innovador para el laboratorio de energías renovables.
- El análisis de correlación de Pearson mostró que la temperatura no fue un factor determinante en la producción de biogás ($r = 0.453$ para M1), gracias al control térmico estable (39.8 ± 0.2°C). En cambio, el pH fue altamente influyente en la Mezcla 1 ($r = 0.851$), debido a la presencia de sangre y lodos, mientras que la Mezcla 2 mostró una correlación débil ($r = 0.153$), confirmando su mayor

estabilidad, atribuible al estiércol. Esto refuerza que la Mezcla 2 es más robusta para aplicaciones prácticas.

- Sobre la evaluación del rendimiento de biogás, la estadística descriptiva mostró que la Mezcla 1 alcanzó una producción media de 2.617 L con una desviación estándar de 0.039 L (CV = 1.50%), mientras que la Mezcla 2 presentó una media de 2.576 L con una desviación estándar de 0.004 L (CV = 0.14%). La prueba de Shapiro-Wilk confirmó la normalidad de los datos en ambas mezclas ($p > 0.05$), y la prueba de Levene indicó homogeneidad de varianzas. La prueba t para muestras independientes arrojó un valor p de 0.206, superior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), por lo que no se rechaza la hipótesis nula; es decir, no existe evidencia estadísticamente suficiente para afirmar que el rendimiento de biogás difiere significativamente entre las dos mezclas evaluadas. No obstante, el tamaño del efecto calculado mediante la d de Cohen fue de 1.51, un valor que supera ampliamente el umbral de 0.8 para considerar un efecto grande, lo que indica que la diferencia observada es prácticamente relevante, aunque no estadísticamente significativa debido a la alta variabilidad intra-grupo y el reducido tamaño de muestra.
- Si bien la generación eléctrica estimada (58 kWh/año) representa una fracción modesta del consumo total de la planta (0.071%), el valor del proyecto no reside en la cobertura energética, sino en tres pilares: (1) la gestión integral del 100% de los residuos generados, evitando su disposición incontrolada; (2) la reducción de emisiones de metano (GEI) al capturar y aprovechar el biogás; y (3) la generación de energía para usos internos (calefacción de agua, secado, o iluminación de áreas específicas), lo que representa un ahorro operativo y una mejora en la huella ambiental de la planta.

- El modelado dinámico mediante funciones de transferencia evidenció que la Mezcla 1 (CR+E+S+PTAR) presentó una dinámica más compleja que la Mezcla 2 (CR+E), reflejada en la necesidad de modelos de tercer orden con fase no mínima debido a la rápida hidrólisis de proteínas de la sangre y la baja relación C/N (9.23), mientras que la Mezcla 2 pudo ser representada adecuadamente mediante modelos de primer orden, confirmando una dinámica más simple y predecible por su relación C/N más equilibrada (13.6:1) y su mayor reproducibilidad entre réplicas. Los modelos alcanzaron Best Fit promedio del 81.21% y 77.35% para las Mezclas 1 y 2 respectivamente, demostrando que ambos representan adecuadamente el proceso. En consecuencia, la Mezcla 2 es la opción más adecuada para una operación estable y de fácil control, mientras que la Mezcla 1 requerirá sistemas de control avanzado (MPC) para manejar su dinámica de fase no mínima.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda implementar un biodigestor piloto a escala real enfocado inicialmente en la gestión integral de residuos y la generación de energía térmica para procesos internos (calentamiento de agua de limpieza o secado de subproductos), antes de considerar la generación eléctrica como objetivo principal.
- Se sugiere investigar las causas de la alta variabilidad observada en la Mezcla 1 (CV = 18.4%), particularmente en lo que respecta a la concentración de amonio liberada por la sangre y los lodos, ya que este podría ser el factor determinante de la inestabilidad del proceso. Se propone también evaluar pretratamientos (térmicos, químicos o biológicos) para reducir la carga nitrogenada de la sangre y los lodos PTAR, con el objetivo de incorporarlos de manera más eficiente en la mezcla sin comprometer la estabilidad del proceso.

- Se recomienda institucionalizar el biodigestor prototipo construido como equipo de laboratorio permanente, desarrollando guías de prácticas académicas para las asignaturas de Bioenergía, y a fines, donde los estudiantes puedan experimentar con diferentes tipos de sustratos y configuraciones operativas.
- Se recomienda evaluar la codigestión de la Mezcla 1 (residuos de la planta de faenamiento) con residuos orgánicos generados en el mercado de Atuntaqui (frutas, verduras y flores en mal estado), con el objetivo de mejorar el rendimiento de biogás y la estabilidad del proceso. Según estudios especializados, los residuos de plantas de faenamiento presentan una relación C/N baja (5.75-9.23), mientras que los residuos de frutas y verduras tienen una relación C/N alta (>30:1), por lo que su combinación permite equilibrar la relación C/N hacia el rango óptimo de 20-30:1. Esta estrategia permitiría mejorar el rendimiento de la Mezcla 1 (actualmente 2.617 L de biogás con 52% CH_4) y aprovechar simultáneamente dos flujos de residuos orgánicos generados en el cantón Antonio Ante, promoviendo un enfoque de economía circular a nivel local.
- Realizar un análisis técnico-económico completo que considere la inversión inicial, costos operativos, ingresos por generación eléctrica y ahorro por disposición de residuos, a fin de determinar la viabilidad financiera del proyecto a escala real y los posibles mecanismos de financiamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adnane, I., Taoumi, H., Elouahabi, K., Lahrech, K., & Oulmekki, A. (2024). Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology. *Heliyon*, *10*(5), e26440. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E26440

Agrocalidad. (2021). LISTADO DE MATADEROS DE IMBABURA. En *https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Imbabura.pdf*.

Agrocalidad. (2024). *Plantas de Faenamiento en el Ecuador*. https://www.agrocalidad.gob.ec/.

Alarcón, C. (2016). *Diseño de un Biodigestor Anaeróbico para procesar los desechos sólidos del Centro de faenamiento Municipal de ganado de Orellana.*

Angel Cuapio, A., Escamilla Lozano, Y., & Serrano Maldonado, M. J. (2016). Obtención de energía a partir de residuos sólidos: Situación actual en el Estado de México. En *Artículo Revista de Investigación y Desarrollo Septiembre* (Vol. 2, Número 5). www.ecorfan.org/spain

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, L., Guwy, A., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Van Lier, B. (2009). *Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays*.

Angel, M., Alvarez, G., José, O. :, & Franco, A. A. (2017). *Determinación del Potencial Bioquímico de Metano y del Potencial de Suministro Eléctrico Neto de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos de Mercados de Abasto del Distrito de Arequipa*. https://core.ac.uk/download/pdf/225489964.pdf

Appels, L., Lauwers, J., Degrve, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Van Impe, J., & Dewil, R. (2011a). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(9), 4295-4301. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.121

Appels, L., Lauwers, J., Degrve, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Van Impe, J., & Dewil, R. (2011b). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Número 9, pp. 4295-4301). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121

Arango-Osorio, S., Vasco-Echeverri, O., López-Jiménez, G., González-Sanchez, J., & Isaac-Millán, I. (2019). Methodology for the design and economic assessment of anaerobic digestion plants to produce energy and biofertilizer from livestock waste. *Science of The Total Environment*, *685*, 1169-1180. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.015

Arce Cabrera, J. (2011). *Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral.*

Argüello, J., & Cando, C. (2019). *Gestión de residuos sólidos*. www.ecuadorencifras.gob.ec

Armijo Hidalgo, J., & Vera Sanchez, J. (2024). *EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOL EN UN BIODIGESTOR TIPO BATCH UTILIZANDO RESIDUOS ORGÁNICOS DEL CAMAL DEL CANTÓN SAN JOSÉ DE CHIMBO*.

Asís, H., Dopazo, F., & Gianoglio, P. (2006). *PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS OBTENIDO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS*. http://www.frsfco.utn.edu.ar/

Baute Espíndola, E. (2018). *MANUAL CONSTRUCTIVO PARA BIODIGESTOR EXPERIMENTAL*.

Beniche, I., Hugría, J., El Bari, H., Chica, A., & Martín, M. (2021). *Effects of C/N ratio on anaerobic co-digestion of cabbage, cauliflower, and restaurant food waste*. https://www.researchgate.net/publication/341510500_Effects_of_CN_ratio_on_anaerobic_co-digestion_of_cabbage_cauliflower_and_restaurant_food_waste

Bernal, J., & Aguirre, J. (2019). *COMPARACION DEL ESTIÉRCOL BUFALINO Y BOVINO COMO POTENCIALES INÓCULOS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA*.

Budynas, R., & Nisbett, K. (2015). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

Cajamarca, D., Paredes, M., Fernández, D., & Haro, C. (2023). *Biogás como fuente energética limpia bajo modelos de economía circular*. https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3221?utm_source=chatgpt.com

Canaza, S., & Coaquira, Y. (2025). *Evaluación del comportamiento térmico del biodigestor tubular operado en el altiplano Peruano*.

Carrasco García, J. E. (2008). *COMBUSTIÓN DIRECTA DE LA BIOMASA*.

Carvajal Jara, C., Tafur Escanta, P., Villavicencio Poveda, Á., & Gutiérrez Gualotuña, E. (2018). Caracterización del poder calorífico de la biomasa residual de cacao CCN51 mediante procesos de gasificación anaeróbico y termoquímico. *Científica*, *22*(2), 113-123.

Castillo Zhispón, K. D. (2022). *PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA Y AGUAS RESIDUALES DEL CENTRO DE FAENAMIENTO DEL CANTÓN LIMÓN INDANZA-MORONA SANTIAGO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y ABONO ORGÁNICO*.

Cho, E. J., Trinh, L. T. P., Song, Y., Lee, Y. G., & Bae, H. J. (2020). Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. *Bioresource Technology*, *298*, 122386. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122386

Costa, J. M. (2026). Anaerobic Biorefineries for Slaughterhouse Waste and Wastewater: From Process Fundamentals to Resource Recovery. *ACS Engineering Au*. https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.6c00017

Domínguez, R., León, M., Samaniego, J., Sunkel, O., & Sánchez, J. (2019). *Desarrollo Sostenible Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad 70 años de pensamiento de la CEPAL*. www.cepal.org/apps

do Valle, D. S. G. M., Teotônio, M. A., Secundino, J. M. G., da Silva, T. C., Benvenuto, E. A. dos S., Albuquerque, A. A., Alencar, B. R. A., da Silva, A. N., Peres, S., da Costa e Carvalho, R. R., Dutra, E. D., & Menezes, R. S. C. (2026). Greywater use in anaerobic digestion of cattle manure: Advancing biogas yield, energy efficiency, and digestate valorization for environmental sustainability in semi-arid regions. *Science of the Total Environment*, *1016*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2026.181439

Espinosa González, T. (2014). *REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE SULFATOS EN AGUAS RESIDUALES USANDO UN SISTEMA DE LABORATORIO QUE SIMULA UN REACTOR ANAEROBIO DE LECHO DE LODOS DE FLUJO ASCENDENTE (RALLFA)*.

FAO. (2019). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES*. www.fao.org

García, L., Mejía, M., Murcia, R., & Prieto, R. (2011). *Diseño de un biodigestor de flujo inducido con el uso de corrientes térmicas*.

GRECI. (2024). *Boletín 2024 Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva*. www.ambiente.gob.ec

Guares, S. A., Lima, J. D. de, & Oliveira, G. A. (2021). Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer. *Biomass and Bioenergy*, *150*, 106107. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106107

Guimarães, C. D. S., Maia, D. R. D. S., & Serra, E. G. (2018). Construction of biodigesters to optimize the production of biogas from anaerobic co-digestion of food waste and sewage. *Energies*, *11*(4). https://doi.org/10.3390/en11040870

Hejnfelt, A., & Angelidaki, I. (2009). Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. *Biomass and Bioenergy*, *33*(8), 1046-1054. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.004

Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009a). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5478-5484. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.12.046

Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009b). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5478-5484. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046

IGM. (2013). *CAPAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA BÁSICA DEL IGM DE LIBRE ACCESO.*

Incropera, F. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*.

Issahaku, M., Derkyi, N. S. A., & Kemausuor, F. (2024). A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters. *Heliyon*, *10*(1), e24019. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E24019

Joel, A., & Cardozo, F. (2019). *PROPUESTA DE BIODIGESTOR ANAEROBIO DE FLUJO CONTINUO PARA EL TRATAMIENTO DE ESTIÉRCOL BOVINO Y AGUAS RESIDUALES*. https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/12/tratamiento-estiercol-bovino.html

Justine, S. F., Jérôme, D., Emmanuel, A. A., & Philemon, Z. B. (2024). Evaluation of Biogas Production Potential from Organic Waste from the Yaounde Industrial Slaughterhouse and Sizing of a Biomethanation Unit. *European Modern Studies Journal*, *7*(6), 138-151. https://doi.org/10.59573/emsj.7(6).2023.14

Kabeyi, M., & Olanrewaju, O. (2022). *Producción de biogás y aplicaciones en la transición energética sostenible* (Revista de Energía, Vol. 2022). https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/8750221#citedby-section

Kelly Orhorhoro, E., Okechukwu Ebunilo, P., & Ejuvwedia Sadjere, G. (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. https://doi.org/10.11648/j.XXXX.2017XXXX.XX

La Hora. (2024). *Antonio Ante cuenta con una nueva planta municipal de faenamiento*.

Lansing, S., Víquez, J., Martínez, H., Botero, R., & Martin, J. (2008). Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. *Ecological Engineering*, *34*(4), 332-348. https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2008.09.002

Li, Z., You, Z., Zhang, L., & Chen, H. (2024). Effect of total solids content on anaerobic digestion of waste activated sludge enhanced by high-temperature thermal hydrolysis. *Journal of Environmental Management*, *359*, 120980. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120980

López-Escobar, L., Martínez-Hernández, S., Corte-Cano, G., & Méndez-Contreras, J. (2014). Influence of organic loading rate on methane production in a CSTR from physicochemical sludge generated in a poultry slaughterhouse. *Journal of Environmental Science and Health*.

Lorente, L. L., Montero, Y., Herrera Granda, I. D., Machado Orges, C. A., Vacas Palacios, S. M., & Valencia Chapi, R. M. (2018). *Design of a Lab-scale Anaerobic Biodigester for Renewable Energy from Municipal Solid Waste*.

Martina, P., Yank, L., Corace, J., Bucki, B., Aeberhard, R., & Ventín, A. (2005a). ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS EN FUNCIÓN DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS DE MADERA EN UN BIODIGESTOR DEL TIPO DE CARGA UNICA O BATCH. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, *9*.

Martina, P., Yank, L., Corace, J., Bucki, B., Aeberhard, R., & Ventín, A. (2005b). ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS EN FUNCIÓN DE LA CANTIDAD DE

RESIDUOS DE MADERA EN UN BIODIGESTOR DEL TIPO DE CARGA UNICA O BATCH. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, *9*.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). *A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. En *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Número 10). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/ijerph15102224

Méndez-Zetina, F., Pintor-Ibarra, L., Rutiaga-Quiñones, G., & Alvarado-Flores, J. (2023). *Capítulo 6: Análisis elemental en la biomasa con fines energéticos*.

Ministerio del Ambiente y Agua. (2020). *2 Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales*. www.ambiente.gob.ec

Montalbán Romero, A. J. (2020). *Obtención de biogás por digestión anaerobia a partir de la fermentación de tres mezclas de sustratos orgánicos en la comunidad de la Huaquilla*.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (John wiley & sons). https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=Py7bDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&ots=X8w0q2QS2b&sig=rb7S78ZFrBDkvBnxY34zPqm8qoA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Morales Ibarra, V., Salazar Valle, E., Miranda Herrera, M., & Madrid González, V. (2020). Revista de Simulación Computacional Semi-automatización de biodigestor cerdo vs. vaca. *Diciembre*, *4*, 30-35. https://doi.org/10.35429/JCS.2020.12.4.30.35

Mrosso, R., Mecha, A. C., & Kiplagat, J. (2023). Characterization of kitchen and municipal organic waste for biogas production: Effect of parameters. *Heliyon*, *9*(5), e16360. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E16360

Naciones Unidas. (2023, julio 13). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Https://Www.Un.Org/Sustainabledevelopment/Es/.

Njuguna Matheri, A., Mbohwa, C., Ntuli, F., Belaid, M., Seodigeng, T., Catherine Ngila, J., & Kinuthia Njenga, C. (2018). Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 1113-1121. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.051

Nuhu, S. K., Gyang, J. A., & Kwarbak, J. J. (2021). Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance. *Cleaner Engineering and Technology*, *5*, 100298. https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100298

Nuñez-Pin, K. S., & Lino-García, M. J. (2024). Gestión de residuos sólidos en el camal de Jipijapa. *MQRInvestigar*, *8*(2), 2991-3006. https://doi.org/10.56048/mqr20225.8.2.2024.2991-3006

Olvera, C., Silvia, N., Pérez, R., Hernández, M., Medina, S., & Jiménez, A. (2024). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO TIPO BATCH. En *Revista de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable* (Vol. 12).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2019). *GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES* (N° 12). www.fao.org

Pilarski, K., Pilarska, A. A., Boniecki, P., Niedbała, G., Durczak, K., Witaszek, K., Mioduszewska, N., & Kowalik, I. (2020). The efficiency of industrial and laboratory anaerobic digesters of organic substrates: The use of the biochemical methane potential correction coefficient. *Energies*, *13*(5). https://doi.org/10.3390/en13051280

Piskier, T. (2017). A method of estimation of the caloric value of the biomass. Part I-biomass energy potential. *Journal of Mechanical and Energy Engineering ISSN*, *1*(41), 189-194. http://www.jmee.tu.koszalin.pl/download_article/jmee_2017_02_189194.pdf

Rajagopal, R., Massé, D., & Singh, G. (2013). *A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia*.

Reyes Aguilera, E. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*.

Reyes, E. A., & Pérez, E. (2019). Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, (31), 97-108. https://doi.org/10.5377/farem.v0i31.8474

Ripoll, V., Agabo-García, C., Solera, R., & Perez, M. (2023). Anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch and anaerobic sequential batch reactors. En *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 13, Número 13, pp. 11457-11468). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02179-1

Salminen, E., & Rintala, J. (2002). *Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste-a review*.

Sarabia Méndez, M. A., Laines Canepa, J. R., Sosa Olivier, J. A., & Escalante Espinosa, E. (2017). ProducciÓn de biogÁs mediante codigestiÓn anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, *33*(1), 109-116. https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.10

Siciliano, A., Limonti, C., & Curcio, G. M. (2022). Performance Evaluation of Pressurized Anaerobic Digestion (PDA) of Raw Compost Leachate. *Fermentation*, *8*(1). https://doi.org/10.3390/fermentation8010015

Sillero, L., Solera, R., & Perez, M. (2022). Biochemical assays of potential methane to test biogas production from dark fermentation of sewage sludge and agricultural residues. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(27), 13289-13299. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.080

Singh, B., Szamosi, Z., & Siménfalvi, Z. (2019). State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review. *Renewable Energy*, *141*, 922-936. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.04.072

Tipán, E. (2020). *EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MEZCLAS DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA LÁCTEA Y RESIDUOS ORGÁNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA ÓPTIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS*.

UNEP. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024* . Global Waste Management Outlook 2024 .

Urbina, L. E. (2024). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE FLUJO SEMICONTINUO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE HIGUERILLA Y EXCRETAS BOVINAS*.

Vandevivere, P., De Baere, L., & Verstraete, W. (2003). *Types of anaerobic digestorsfor solid Wastes*.

Van Haren, M., & Fleming, R. (2005). *Electricity and Heat Production Using Biogas from the Anaerobic Digestion of Livestock Manure-Literature Review Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs*.

Velásquez Cuadra, V. Y., & González Páez, L. K. (2022). *Diseño y construcción de un sistema de biodigestores tipo Batch a escala laboratorio, para el trabajo experimental del proyecto "Aditivo nanoestructurado para reducir el contenido de H2S en biogás producido por digestión anaerobia" y la Línea de profundización en energías limpias del programa de Ingeniería Ambiental.*

Wang, X., Lu, X., Li, F., & Yang, G. (2014). Effects of temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition. *PLoS ONE*, *9*(5). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097265

Ware, A., & Power, N. (2017). Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions. *Renewable Energy*, *104*, 50-59. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.045

Weiland, P. (2010). *Producción de biogás: estado actual y perspectivas*. *85*, 849. https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7

Zamora Rueda, G., Gutiérrez, C., Mistretta, G., Peralta, F., Golato, M., Ruiz, M., & Paz, D. (1910). Revista industrial y agrícola de Tucumán. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, *93*(2), 07-12. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182016000200002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Zhai, N., Zhang, T., Yin, D., Yang, G., Wang, X., Ren, G., & Feng, Y. (2015). Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. *Waste Management*, *38*(1), 126. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2014.12.027

ANEXOS

Anexo 1. Relación Carbono/Nitrógeno de los sustratos

SUSTRATO	**N [%]**	**C [%]**	**C/N**
E1	2.89	41.16	14.24
E2	2.93	41.11	14.03
E3	2.90	40.44	13.94
CR1	3.20	39.40	12.31
CR2	2.95	40.44	13.71
CR3	2.52	36.61	14.53
S1	15.56	48.81	3.14
S2	14.60	45.73	3.13
S3	14.22	45.70	3.21
PTAR1	3.67	28.61	7.80
PTAR2	3.80	29.06	7.65
PTAR3	3.95	28.61	7.24

Anexo 2. Datos promedio diarios de la mezcla 1

PRUEBA 1

Día	Presión max_hPa	Dif_P_hPa	T_prom_C	R*T_K	pH	Volumen diario _l	Volumen acumulado_l
1	6,23	6,23	37,7264583	25833,7977	6,835	2,413	2,413
2	6,93	0,7	39,7208333	25999,6101	6,561	2,401	2,415
3	9,46	2,53	39,7255319	26000,0007	6,384	2,405	2,420
4	10,8	1,34	38,6597917	25911,3951	6,560	2,403	2,423
5	16,45	5,65	39,7333333	26000,6493	6,829	2,412	2,434
6	27,38	10,93	39,7166667	25999,2637	6,883	2,423	2,457
7	41,82	14,44	39,7208333	25999,6101	6,951	2,430	2,487
8	57,08	15,26	39,725	25999,9565	6,804	2,432	2,519

9	70,63	13,55	39,7263863	26000,0718	6,977	2,428	2,547
10	98,7	28,07	39,7333333	26000,6493	6,991	2,458	2,606
11	82,94	15,76	39,7166667	25999,2637	7,017	2,433	2,638
12	86,6	3,66	39,7208333	25999,6101	7,017	2,408	2,646
13	86,6	0	39,725	25999,9565	7,013	2,400	2,646
14	89,17	2,57	39,7291667	26000,3029	7,014	2,405	2,651
15	89,26	0,09	39,7333333	26000,6493	7,009	2,400	2,652

PRUEBA 2

Día	Presión max_hPa	Dif_P_hPa	T_prom_C	R*T_K	pH	Volumen diario _l	Volumen acumulado_l
1	6,49	6,49	26,1688	24872,894	6,852	2,414	2,414
2	7,86	1,37	36,4227083	25725,404	6,752	2,403	2,417
3	8,18	0,32	39,8352083	26009,1192	6,624	2,401	2,418
4	12,81	4,63	39,848125	26010,1931	6,537	2,410	2,427
5	19,17	6,36	39,8679167	26011,8386	6,600	2,413	2,441
6	27,92	8,75	39,8579167	26011,0072	6,688	2,418	2,459
7	41,6	13,68	39,854375	26010,7127	6,773	2,428	2,487
8	53,66	12,06	39,8435417	26009,8121	6,871	2,425	2,512
9	66,47	12,81	39,8398969	26009,509	6,956	2,427	2,539
10	74,61	8,14	39,8329167	26008,9287	7,040	2,417	2,556
11	80,68	6,07	39,880625	26012,8952	7,060	2,413	2,569
12	84,07	3,39	39,835	26009,1019	7,004	2,407	2,576
13	85,75	1,68	39,8060417	26006,6943	6,917	2,403	2,579
14	86,32	0,57	39,8602083	26011,1977	6,867	2,401	2,580
15	87,92	1,6	39,8566667	26010,9033	6,875	2,403	2,584

PRUEBA 3

Día	Presión max_hPa	Dif_P_hPa	T_prom_C	R*T_K	pH	Volumen diario _l	Volumen acumulado_l
1	5,74	5,74	24,718	24752,2745	6,878	2,413	2,413
2	6,82	1,08	32,6308333	25410,1475	6,792	2,402	2,415
3	8,53	1,71	39,8197917	26007,8375	6,653	2,404	2,418
4	10,28	1,75	39,9175	26015,961	6,514	2,404	2,422
5	16,29	6,01	39,9260417	26016,6711	6,559	2,413	2,435
6	24,57	8,28	39,9039583	26014,8351	6,646	2,417	2,452
7	36,64	12,07	39,9291667	26016,9309	6,739	2,425	2,477

8	52,39	15,75	39,9333333	26017,2773	6,827	2,433	2,510
9	64,71	12,32	39,8810066	26012,9269	6,932	2,426	2,535
10	74,93	10,22	39,8779167	26012,67	7,008	2,421	2,557
11	80,01	5,08	39,89125	26013,7785	7,017	2,411	2,567
12	85,18	5,17	39,9125	26015,5453	6,970	2,411	2,578
13	86,35	1,17	39,91375	26015,6492	6,897	2,402	2,580
14	87,38	1,03	39,9022917	26014,6965	6,888	2,402	2,582
15	87,84	0,46	39,8745833	26012,3929	6,934	2,401	2,583

Anexo 3. Datos promedio diarios de la mezcla 2

PRUEBA 1

Día	Presión max_hPa	Dif_P_hPa	T_prom_C	R*T_K	pH	Volumen diario _l	Volumen acumulado_l
1	4,62	4,62	24,219	24710,7877	6,883	2,410	2,410
2	6,11	1,49	31,69125	25332,0305	6,832	2,403	2,413
3	7,8	1,69	39,66625	25995,072	6,776	2,404	2,417
4	9,6	1,8	39,8814583	26012,9644	6,716	2,404	2,421
5	13,41	3,81	39,8435417	26009,8121	6,734	2,408	2,428
6	19,1	5,69	39,84875	26010,2451	6,795	2,412	2,440
7	27,54	8,44	39,82875	26008,5823	6,846	2,418	2,458
8	36,8	9,26	39,8458333	26010,0026	6,907	2,419	2,477
9	46,78	9,98	39,8448116	26009,9176	6,966	2,421	2,498
10	57,3	10,52	39,8519149	26010,5082	7,026	2,422	2,520
11	63,35	6,05	39,8252083	26008,2878	7,069	2,413	2,532
12	69,6	6,25	39,846875	26010,0892	7,059	2,413	2,545
13	73,39	3,79	39,8404167	26009,5522	7,006	2,408	2,553
14	75,67	2,28	39,874375	26012,3755	6,934	2,405	2,558
15	77,51	1,84	39,854375	26010,7127	6,893	2,404	2,562

PRUEBA 2

Día	Presión max_hPa	Dif_P_hPa	T_prom_C	R*T_K	pH	Volumen diario _l	Volumen acumulado_l
1	5,73	5,73	26,9296154	24936,1482	6,888	2,412	2,412
2	7,3	1,57	36,77875	25755,0053	6,843	2,403	2,416
3	9,28	1,98	39,8727083	26012,237	6,783	2,404	2,420
4	13,14	3,86	39,8833333	26013,1203	6,759	2,408	2,428

5	17,58	4,44	39,8791667	26012,7739	6,807	2,409	2,437
6	25,1	7,52	39,8910417	26013,7612	6,853	2,416	2,453
7	35,6	10,5	39,8727083	26012,237	6,906	2,422	2,475
8	46,91	11,31	39,8914583	26013,7958	6,952	2,424	2,498
9	55,88	8,97	39,8710107	26012,0958	7,016	2,419	2,517
10	64,12	8,24	39,8812766	26012,9493	7,053	2,417	2,534
11	70,49	6,37	39,8785417	26012,722	7,039	2,413	2,547
12	74,59	4,1	39,87375	26012,3236	6,980	2,409	2,556
13	76,55	1,96	39,8791667	26012,7739	6,919	2,404	2,560
14	79,11	2,56	39,8945833	26014,0557	6,906	2,405	2,565
15	79,87	0,76	39,868125	26011,8559	6,952	2,402	2,567

PRUEBA 3

Día	Presión max_hPa	Dif_P_hPa	T_prom_C	R*T_K	pH	Volumen diario _l	Volumen acumulado_l
1	6,04	6,04	30,5004167	25233,0246	6,885	2,413	2,413
2	8,06	2,02	39,6858333	25996,7002	6,822	2,404	2,417
3	10,59	2,53	39,8916667	26013,8132	6,783	2,405	2,422
4	15,39	4,8	39,89125	26013,7785	6,813	2,410	2,432
5	22,9	7,51	39,8902083	26013,6919	6,864	2,416	2,448
6	30,89	7,99	39,89125	26013,7785	6,908	2,417	2,465
7	42,75	11,86	39,9010417	26014,5926	6,956	2,425	2,489
8	53,89	11,14	39,88	26012,8432	7,005	2,423	2,513
9	62,51	8,62	39,8934297	26013,9597	7,058	2,418	2,530
10	69,99	7,48	39,89875	26014,4021	7,050	2,416	2,546
11	74,34	4,35	39,9052083	26014,939	7,005	2,409	2,555
12	77,06	2,72	39,91375	26015,6492	6,943	2,406	2,561
13	78,94	1,88	39,8808333	26012,9125	6,922	2,404	2,565
14	80,54	1,6	39,8827083	26013,0684	6,948	2,403	2,568
15	81,24	0,7	39,8833333	26013,1203	7,008	2,401	2,569