



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOGAS A PARTIR DE LAS EXCRETAS DE GANADO BOVINO
DE RAZA HOLSTEIN EN LA HACIENDA LA ESTANCIA - ILAPO**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: JUAN GABRIEL HEREDIA MOYANO

DIRECTOR: Ing. CARLOS ALCIBAR MEDINA SERRANO, MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

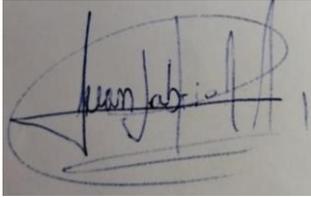
© 2022 Juan Gabriel Heredia Moyano

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, JUAN GABRIEL HEREDIA MOYANO, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del este documento son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 19 de julio del 2022

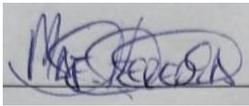
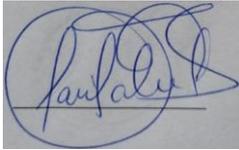
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Juan Gabriel Heredia Moyano', enclosed within a hand-drawn oval shape.

Juan Gabriel Heredia Moyano

C.I. 060394584-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, **DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE LAS EXCRETAS DE GANADO BOVINO DE RAZA HOLSTEIN EN LA HACIENDA LA ESTANCIA – ILAPO**, realizado por el señor **JUAN GABRIEL HEREDIA MOYANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Biof. María Fernanda Heredia Moyano, MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	2022-07-19
Ing. Carlos Alcívar Medina Serrano, MSc. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	2022-07-19
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes, MSc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 _____	2022-07-19

DEDICATORIA

A mis padres: en memoria de mi padre Washington Heredia (+) quien fue un ejemplo de lucha constante en salud y enfermedad, educación, sabiduría y humildad, ante todo. A mi madre Martha Moyano por su valentía, paciencia y apoyo a pesar de toda adversidad y su ejemplo de que nunca es tarde para adquirir y enriquecerse de nuevos conocimientos.

A mi hermano Byron, mis hermanas Sandra y Fernanda cada uno a su manera con su forma de ser, quienes han estado siempre a mi lado con su apoyo incondicional inculcando el ejemplo de triunfar en la vida, abatiendo los malos momentos y aprovechando siempre las oportunidades de superación con perseverancia, empeño e intrepidez. Mis sobrinos Josué, Keyla, Ezio y a Sofy mi querida hija.

Juan

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por la formación académica, agradezco al Ing. Carlos Medina y al Ing. Paúl Palmay por la ayuda y confianza brindada en el trabajo de titulación.

Agradezco a mis padres por brindarme toda su ayuda y comprensión, a mis hermanos y a mis amigos quienes han sido motor principal en mi vida.

Juan

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.2.1. Enunciado del problema	3
1.2.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Marco teórico.....	5
1.5.1. Biodigestor	5
1.5.1.1. Tipos de Biodigestores	5
1.5.1.2. Modelos de los digestores	6
1.5.1.3. Componentes de un biodigestor	8
1.5.2. Digestión Anaerobia.....	9
1.5.2.1. Fases de la fermentación anaerobia	10
1.5.2.2. Elementos tóxicos en la digestión anaerobia.....	11
1.5.3. Biogás	12
1.5.3.1. Condiciones generales para la producción de biogás	12
1.5.3.2. Composición del Biogás.....	17
1.5.3.3. Principales compuestos tóxicos del biogás.....	19
1.5.3.4. Fuentes para la producción de biogás	20
1.5.3.5. Aplicaciones del Biogás	20
1.5.3.6. Almacenamiento del biogás	22
1.5.4. Base Legal	25

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	27
2.1.	Lugar de estudio	27
2.2.	Muestreo	27
2.3.	Elaboración de los biodigestores experimentales	28
2.3.1.	<i>Procedimiento</i>	29
2.4.	Adaptación del lugar para la instalación de los biodigestores	29
2.5.	Instalación de los biodigestores	30
2.5.1.	<i>Determinación de la carga diaria de estiércol</i>	30
2.5.2.	<i>Preparación del sustrato</i>	31
2.6.	Monitoreo de la temperatura	31
2.7.	Monitoreo del pH	32
2.8.	Prueba de la probeta	32
2.9.	Prueba de flama	32

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1.	Etapas Preliminar	33
3.1.1.	<i>Análisis Físico - Químico del Estiércol</i>	33
3.1.2.	<i>Cálculo de la cantidad de biogás consumido por la Hacienda La Estancia</i>	34
3.1.2.1.	<i>Cantidad de gas GLP en m³ de biogás</i>	34
3.2.	Cálculos de Diseño del Biodigestor	34
3.2.1.	<i>Cálculo de la cantidad de estiércol producido al día</i>	34
3.2.2.	<i>Cálculo de la dilución del sustrato inicial</i>	35
3.2.3.	<i>Biodigestor experimental 2</i>	36
3.2.3.1.	<i>Carga Diaria B. Exp. 2</i>	36
3.2.3.2.	<i>Volumen Líquido B. Exp. 2</i>	36
3.2.3.3.	<i>Volumen Gaseoso B. Exp. 2</i>	37
3.2.3.4.	<i>Volumen Total del B. Exp. 2</i>	37
3.2.3.5.	<i>Dimensionado del B. exp. 2</i>	37
3.2.4.	<i>Biodigestor experimental 3</i>	39
3.2.4.1.	<i>Carga Diaria B. Exp. 3</i>	39
3.2.4.2.	<i>Volumen Líquido B. exp. 3</i>	39
3.2.4.3.	<i>Volumen gaseoso B. exp. 3</i>	40

3.2.4.4.	<i>Volumen Total B. exp. 3</i>	40
3.2.4.5.	<i>Dimensionado del B. exp. 3</i>	40
3.3.	Análisis de Resultados	41
3.3.1.	<i>Monitoreo de Temperatura</i>	41
3.3.2.	<i>Biodigestor experimental 2</i>	44
3.3.3.	<i>Biodigestor experimental 3</i>	44
3.3.4.	<i>Temperatura del Biodigestor 2 y Biodigestor 3</i>	45
3.3.5.	<i>Influencia del acondicionamiento térmico en la producción de biogás</i>	46
3.3.6.	<i>Monitoreo de pH</i>	46
3.3.6.1.	<i>Influencia del pH en la producción del biogás</i>	48
3.3.7.	<i>Volumen de biogás generado</i>	48
3.3.7.1.	<i>Discusión de la producción de biogás – efecto melaza</i>	50
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES	52
	BIBLIOGRÁFICAS	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Ventajas y Desventajas de los diferentes Modelos de Biodigestores.....	8
Tabla 2-1:	Bacterias presentes en las etapas metabólicas.....	11
Tabla 3-1:	Principales características de la Etapa Acidogénicas y Metanogénica.	11
Tabla 4-1:	Elementos inhibidores en la digestión anaerobia.....	12
Tabla 5-1:	Composición del estiércol de diferentes especies animales.....	13
Tabla 6-1:	Producción de estiércol por especie.....	13
Tabla 7-1:	Microorganismos presentes en la digestión anaerobia según la Temperatura	14
Tabla 8-1:	Relación C/N de los residuos de animales domésticos.....	15
Tabla 9-1:	Rangos de pH por etapas.....	16
Tabla 10-1:	Tiempo de retención del estiércol de ganado en diferentes climas.....	16
Tabla 11-1:	Composición química del biogás.....	17
Tabla 12-1:	Características del biogás.....	18
Tabla 13-1:	Límites de concentración del H ₂ S y mercaptanos.....	19
Tabla 14-1:	Equivalencias de 1m ³ de biogás con otros combustibles.....	21
Tabla 15-1:	Descripción de las Aplicaciones del Biogás.....	22
Tabla 16-1:	Texto legal.....	25
Tabla 1-2:	Parámetros analizados del estiércol de vaca de la Hacienda La Estancia.....	28
Tabla 2-2:	Parámetros Generales de los Biodigestores Experimental 1,2 y 3.....	28
Tabla 3-2:	Datos del ganado bovino – muestra aleatoria simple.....	30
Tabla 4-2:	Materia orgánica contenida en el sustrato.....	31
Tabla 1-3:	Características del estiércol del ganado bovino de la Hacienda “La Estancia” ...	33
Tabla 2-3:	Estiércol diario producido por el ganado bovino de la Hacienda La Estancia.....	34
Tabla 3-3:	Monitoreo de Temperatura interna y ambiental.....	41
Tabla 4-3:	Valores de pH durante la generación de biogás.....	46
Tabla 5-3:	Volumen de biogás Biodigestor 2 y Biodigestor 3.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Representación del Biodigestor Modelo Hindú	6
Figura 2-1:	Representación del Biodigestor Modelo Chino	7
Figura 3-1:	Representación del Biodigestor tubular o de flujo pistón	8
Figura 4-1:	Esquema de la digestión anaerobia de materia orgánica compleja	9
Figura 5-1:	Diferentes Aplicaciones del biogás.....	21
Figura 1-2:	Localización Geográfica de la Hacienda “La Estancia” – Ilapo	27

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Temperatura ambiental en lapso de 40 días	43
Gráfico 2-3: Temperatura B. exp. 2 vs Temperatura ambiente	44
Gráfico 3-3: Temperatura B. exp. 3 vs Temperatura Ambiente	45
Gráfico 4-3: Temperatura Biodigestor 2 vs Biodigestor 3	46
Gráfico 5-3: Valores de pH	47
Gráfico 6-3: Volumen de biogás en Biodigestor 2	49

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-3	34
Ecuación 2-3	35
Ecuación 3-3	36
Ecuación 4-3	36
Ecuación 5-3	37
Ecuación 6-3	37
Ecuación 7-3	38
Ecuación 8-3	38
Ecuación 9-3	38
Ecuación 10-3	38
Ecuación 11-3	39
Ecuación 12-3	39
Ecuación 13-3	40
Ecuación 14-3	40
Ecuación 15-3	40
Ecuación 16-3	41

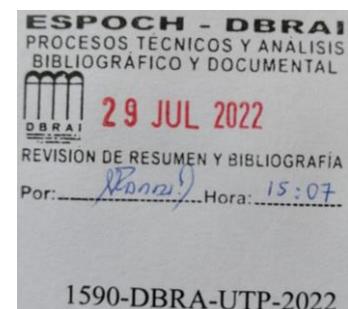
ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** INSTALACIONES HACIENDA “LA ESTANCIA
- ANEXO B:** PESAJE Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE ESTIÉRCOL
- ANEXO C:** CONSTRUCCIÓN DE LOS BIODIGESTORES EXPERIMENTALES
- ANEXO D:** PREPARACIÓN DEL ÁREA E INSTALACIÓN DE LOS BIODIGESTORES
- ANEXO E:** INSTALACIÓN DE LOS BIODIGESTORES EXPERIMENTALES
- ANEXO F:** CARGA DE LOS BIODIGESTORES EXPERIMENTALES
- ANEXO G:** MONITOREO DE PARÁMETROS DE CONTROL
- ANEXO H:** PRUEBA DE FLAMA Y PROBETA
- ANEXO I:** RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DEL ESTIÉRCOL

RESUMEN

En la presente investigación se diseñó un biodigestor para obtener biogás a partir del estiércol de ganado bovino generado en la Hacienda La Estancia ubicada en la provincia de Chimborazo parroquia Ilapo. Se planteó el diseño experimental a partir de tres muestras instaladas bajo condiciones de mejoramiento térmico; la primera muestra considerada como blanco formada por la mezcla de estiércol-agua con una dilución proporcional de dos veces, es decir dos kilogramos de agua por cada kilogramo de estiércol, fue comparada frente a las muestras 2 y 3 con adición de 6% y 3% de melaza respectivamente del volumen total del sustrato. Se realizó el monitoreo de los tres biodigestores experimentales durante el tiempo de permanencia del sustrato a partir de los cuales se obtuvo los datos de temperatura, pH y se realizó las pruebas de probeta y de flama durante el tiempo de generación de biogás. Se aplicó cálculos para el diseño de un biodigestor a partir de un total de 50 vacas con una carga diaria de estiércol de 990 kilogramos por cada día mediante los cuales se eligió el biodigestor experimental 2 con los siguientes parámetros: tiempo de retención 30 días, volumen total del biodigestor 39,6 metros cúbicos, diámetro 3,54 metros, longitud 4,02 metros. Se concluyó que la producción de biogás es de 9,9 metros cúbicos diarios con lo que se abastece el 100% del valor requerido de gas licuado de petróleo utilizado en las actividades productivas de la Hacienda La Estancia. Se recomienda ampliar las investigaciones excluyendo la adición de melaza e implementando mejoramiento térmico especializado que contribuya a evadir las condiciones ambientales propias del sector que son desfavorables para la digestión anaerobia debido a que la adición del 6% de melaza representa un gasto económico elevado que califica la producción de biogás como no rentable.

Palabras clave: <DIGESTIÓN ANAEROBIA>, <BIODIGESTOR>, <METANOGÉNESIS>, <ESTIÉRCOL>, <BIOGÁS>.



ABSTRACT

The aim of this research was to design a biodigester for the obtention of biogas from cattle manure generated by “La Estancia” Farm, located in Ilapo rural parish, Chimborazo province. The experimental design was proposed based on three samples set under thermal improvement conditions. The first sample considered as a control sample, was formed by a manure-water mixture with a two-fold proportional dilution. That is, two kilograms of water per each kilogram of manure, this mixture was compared with samples 2 and 3, adding a 6% and 3 % of molasses regarding the total volume of the substrate. The monitoring of the three experimental biodigesters was carried out during the permanence time of the substrate. So, the temperature and pH data were obtained. On the other hand, the Test tube and flame tests were carried out during the generation of biogas. Some calculations were also applied for the design of a biodigester, which was based on the information obtained from 50 cows producing a daily manure load of 990 kilograms per day; through which the experimental biodigester 2 was chosen taking into account the following parameters: retention time 30 days, total volume of the biodigester 39.6 cubic meters, diameter

3.54 meters and length 4.02 meters. It was concluded that the production of biogas is 9.9 cubic meters per day, which supplies 100% of the required value of liquefied petroleum gas used in the productive activities of La Estancia Farm. It is recommended to expand the research excluding the addition of molasses and implementing specialized thermal improvement which avoids the environmental conditions of the area, the ones which are considered unfavorable for the anaerobic digestion, since the addition of 6% molasses represents a high economic cost, this makes the production of biogas becomes unprofitable.

Keywords: <ANAEROBIC DIGESTION>, <BIODIGESTER>, <METHANOGENESIS>, <MANURE>, <BIOGAS>.



Firmado electrónicamente por:

**PAUL
ROLANDO
ARMAS
PESANTEZ**

INTRODUCCIÓN

Las diferentes actividades productivas para el desarrollo económico-industrial utilizan cantidades grandes de energía orientadas al funcionamiento de maquinarias, producción de luz, calor y refrigeración como primordiales. El consumo energético en la actualidad se ha incrementado debido al cambio en el estilo de vida y la implementación de la tecnología en los países desarrollados.

Los combustibles fósiles en combinación con ciertas formas de energía renovable representan las fuentes primarias de producción energética, posibles de generar calor, vapor o energía mecánica. Las energías renovables se consideran una alternativa para el reemplazo del uso de combustibles fósiles, que demoran miles de años para su formación y generan impactos potencialmente negativos al medio ambiente.

La ganadería, es una de las actividades económicas principales del sector rural de la Provincia de Chimborazo, en la cual, mediante la crianza y producción de ganado, se genera una gran acumulación de los desechos provenientes de los diferentes tipos de animales domésticos, en el presente estudio se tomará en cuenta el estiércol del ganado bovino. La falta de conocimiento en la población, ocasiona la inadecuada manipulación y disposición final del estiércol del ganado bovino, lo cual es un foco de contaminación ambiental, que provoca efectos negativos a los diferentes ecosistemas (terrestres, acuáticos, microbiano), con la acumulación de elementos naturales como nitrógeno, fósforo, potasio y otros, que al presentar concentraciones extremas, provocan efectos tóxicos al medio físico como es el suelo, aire tierra y a su población que la habita.

Mediante estudios realizados por (Barrena y Maieelo, 2018, p.4), se ha comprobado que el estiércol de ganado bovino, bajo un tratamiento adecuado y la aplicación de la biotecnología, produce biogás, el cual puede ser utilizado como fuente de calor para las diferentes actividades como son la combustión y generación de energía, las cuales pueden ser aprovechadas en los sectores rurales agrícolas como principales beneficiarios. También puede ser aprovechado para la producción de abono orgánico aplicable en los cultivos, para la conservación y mejoramiento de las propiedades del suelo para el uso agrícola.

En la Hacienda La Estancia, ubicada en la comunidad Chipza de la Parroquia Ilapo, se evidencia la problemática mencionada, que es generada por la actividad ganadera del lugar y se suma la falta de accesibilidad para el abastecimiento de gas GLP, utilizado en las diferentes actividades. Para lo cual se aplica la biotecnología para el diseño de un Biodigestor, para la producción de biogás a partir de las excretas de ganado bovino de raza Holstein disponible en el lugar, mediante el análisis y estudio de los diferentes parámetros propios del lugar y de las reses disponibles.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

La generación de biogás mediante la digestión anaerobia a partir del estiércol de ganado bovino es un tipo de energía limpia utilizada ya en algunos países de Latinoamérica, generando con ello, un valor positivo a los residuos orgánicos del sector agrícola – ganadero, generando combustible y abono orgánico.

Durante el siglo XX, fueron fabricados los primeros biodigestores en China a base de ladrillo y eran enterrados en el piso y cerrados herméticamente. Debido a los costos de su construcción, este tipo de biodigestores no era accesible para poblaciones pequeñas del sector rural, por decadencia de recursos económicos.

A finales de los ochenta, se propone los biodigestores familiares como incentivo para el desarrollo agropecuario de los países en desarrollo, los cuales tenían costos accesibles para familias cortas y con un alcance de recuperación de la inversión a corto tiempo en dos a tres años, por lo cual, empezó la instalación de este tipo de biodigestores en Latinoamérica y el Caribe, iniciando por Colombia (Redbiolac, 2020, p.5).

Doroteo Juan (2012, p.59), en su investigación, “Aprovechamiento de biogás proveniente del abono de ganado vacuno en un establo ubicado en Ixtapaluca Estado de México” demuestra con su estudio que el biogás es una opción de uso de energías renovables que contribuye a la disminución del consumo de combustibles fósiles y fuentes de energía costosas y poco accesibles. Mediante resultados obtenidos, concluye que en el establo Los Montaña donde realizó su estudio, la producción de 250 kg de excretas diarias generadas por el ganado vacuno pueden producir 5 m³ de biogás al mes, lo cual sustituye la compra de dos tanques de gas GLP al mes (Doroteo 2020, p.43).

Toscano Tatiana (2016), en su investigación, “Diseño de un biodigestor anaeróbico para la obtención de biogás, a partir de las excretas de ganado vacuno en el rancho Guadalupe, en el cantón Mocha Provincia de Tungurahua en el Año 2015”, mediante el diseño de un biodigestor tubular de flujo continuo de polietileno y el diseño de un invernadero donde se colocó el biodigestor para el incremento de las temperaturas, lo cual favorece las reacciones de la digestión anaerobia, concluyó mediante los resultados obtenidos que el biodigestor producirá 4,51 m³/día de biogás luego de un tiempo de retención de 45 días (Toscano, 2016, p.7).

Leyton Pérez (2021), en su trabajo de investigación, “Producción y evaluación de biogás en un biodigestor usando estiércol de vaca en el cantón Milagro”, tiene como objetivo determinar la producción de biogás en un biodigestor usando estiércol de vaca en el cantón Milagro, en la cual,

mediante la comparación de tres tratamientos con diferentes relaciones estiércol : agua, Biodigestor 1 (20kg:25lt), Biodigestor 2 (25kg:30lt) y Biodigestor 3 (30kg:35lt), determina mediante resultados que el Tratamiento 3 presentó un pH de 7 y mayor concentración de nutrientes minerales en su composición (71%) y se obtuvo alta cantidad de biogás (6.75kg de lixiviado) en comparación con los otros dos tratamientos (Pérez, 2021, p.43).

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Enunciado del problema

La acumulación del estiércol de ganado bovino representa un contaminante ambiental cuando no tiene la adecuada disposición final, tratamiento y transporte debido a la emisión de gases tóxicos liberados a la atmósfera y la acumulación de macro y micronutrientes que pueden alterar las propiedades naturales del suelo y recursos hídricos.

El biogás es un elemento necesario para la producción de calor, utilizado en actividades cotidianas como la cocción de alimentos, calentamiento de agua, actividades de aseo humano y animal. La Hacienda La Estancia de la Parroquia Ilapo utiliza gas GLP para sus actividades diarias y se encuentra a una distancia de 23.6 km del sector urbano por lo cual no tiene disponibilidad inmediata del recurso.

Se propone el diseño de un biodigestor para generar biogás y abono orgánico a partir del estiércol del ganado bovino disponible de tal manera que pueda reemplazar el uso de gas GLP y contribuir a la descontaminación ambiental del sector mediante el uso de energías limpias y renovables.

1.2.2. Formulación del problema

¿Será posible generar biogás utilizando excretas de ganado bovino de raza Holstein en la Hacienda La Estancia bajo las condiciones de la zona altiplano a una temperatura promedio de 11°C?

1.3. Justificación

El desarrollo del presente proyecto, orientado a la producción de biogás a partir del estiércol de ganado bovino en la Hacienda la Estancia ubicada en la comunidad Chipza perteneciente a la Parroquia de Ilapo en la Provincia de Chimborazo, se debe al interés de aplicar las técnicas de la biotecnología ambiental (biodigestor) con la finalidad de agregar un valor productivo al estiércol del ganado bovino que actualmente representa un desecho orgánico producido a diario en grandes

cantidades por 50 reses las mismas que son utilizadas únicamente como abono orgánico dispersándolas sin previo tratamiento sobre los cultivos forrajeros que son la fuente de alimentación del ganado lo cual representa una contaminación ambiental con posibles efectos negativos como la propagación de agentes patógenos.

También es importante considerar la falta de accesibilidad inmediata y abastecimiento domiciliario de gas GLP el cual es utilizado a diario en las distintas actividades vitales y productivas en la Hacienda, debido a la distancia extensa hacia el sector urbano y la falta de cobertura de telecomunicaciones con las diferentes operadoras telefónicas que brindan sus servicios en el País. Por ello con el siguiente proyecto se contribuirá a la descontaminación ambiental del sector y a su vez a la producción de un recurso necesario para las actividades de la Hacienda mediante la generación constante de biogás.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un biodigestor para la obtención de biogás generado por las excretas de ganado bovino, raza Holstein, en la Hacienda la Estancia.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el tiempo de generación de biogás a través de experimentos de campo con las condiciones propias del lugar.
- Comparar el tiempo de generación de biogás a partir de una muestra de control frente a dos muestras con concentraciones de melaza al 3% y 6% para determinar el efecto que representan con el tiempo del proceso de biodigestión.
- Determinar las proporciones adecuadas que generen mayor volumen de biogás.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Biodigestor

El biodigestor es un contenedor cerrado herméticamente, elaborado por diferentes tipos de materiales y que pueden ser instalados bajo tierra o sobre la superficie del suelo según su operatividad y condiciones del sector. Su función es la degradación anaeróbica de materia orgánica para la producción general de energías no convencionales, renovables y presenta también la capacidad de formar abono orgánico mediante la fermentación de la carga orgánica en su interior, el cual puede ser aplicado en los cultivos para su fertilización (Campesinos, 2014, p.15).

En el Manual de biodigestores (2011), se consideran las siguientes características que debe presentar un biodigestor para el proceso óptimo de la digestión anaerobia:

- Ser hermético en su totalidad para evitar el ingreso de aire, lo cual interfiere con la digestión anaerobia y también para evitar fugas del biogás.
- Aislamiento térmico para evitar cambios bruscos de temperatura.
- Aunque no se genera alta presión en el interior, es necesario adaptar una válvula de seguridad.
- Tener los medios para ejecutar la carga y descarga del sistema.
- Tener accesibilidad para el mantenimiento.
- Adaptar un medio para romper las costras que se forman en el proceso.

1.5.1.1. Tipos de Biodigestores

Existe una gran variedad de biodigestores de acuerdo a su complejidad y utilización, por lo cual es conveniente clasificarlos según su modo de operación con relación a su carga en los siguientes tres tipos:

- **Continuos:**

En este tipo de biodigestores la alimentación es un proceso ininterrumpido, el efluente a descargar será igual al efluente de carga, con producciones de biogás uniformes en el tiempo. Principalmente son utilizados en el tratamiento de aguas negras y en aplicaciones de tipo industrial debido a su gran capacidad y mayor producción de biogás.

- **Semi - continuos:**

En este biodigestor, posteriormente a la primera carga, se agregan nuevos volúmenes de cargas de materias primas, calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y el volumen total del biodigestor. El efluente descargado tiene la misma cantidad de la nueva carga incorporada. Este proceso es utilizado en sistemas pequeños de uso doméstico.

- **Discontinuos o régimen estacionario (Batch):**

La materia prima en estos biodigestores es alimentada en una sola carga. Después del tiempo de fermentación, cuando el contenido de las materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, los biodigestores son vaciados por completo y se inicia a un nuevo proceso de fermentación (FAO, 2011, p.6).

1.5.1.2. Modelos de los digestores

- **Biodigestor con cúpula o campana flotante**

Es un biodigestor construido con estructura de concreto y un depósito de gas móvil en forma de campana que le permite suspenderse directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás. La campana debe tener una guía que permita el desplazamiento vertical y su altura dependerá del volumen de biogás almacenado. Se lo conoce como biodigestor hindú y es útil cuando se necesita de abastecimiento continuo de biogás y fertilizante. Este biodigestor se caracteriza por tener un depósito interior que almacena el biogás producido.

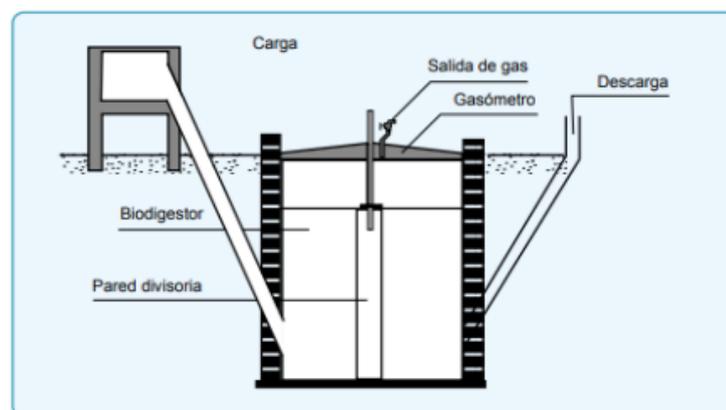


Figura 1-1. Representación del Biodigestor Modelo Hindú

Fuente: FAO, 2011.

- **Biodigestor con cúpula o campana fija**

Este biodigestor es construido en mampostería y contiene un domo fijo e inmóvil sellado, donde se almacena el biogás. Durante el proceso de producción de biogás, la masa de fermentación se desplaza hacia el tanque de compensación y cuando se extrae el biogás, la masa líquida regresa al biodigestor. Las oscilaciones constantes de la masa de fermentación en la parte superior de la cúpula evitan la formación de la capa flotante. También conocido como biodigestor chino, es utilizado en lugares donde requiera consumo continuo de biogás, o a su vez, que se almacene en un depósito externo debido a que necesita liberación continua para reducir la presión interna.

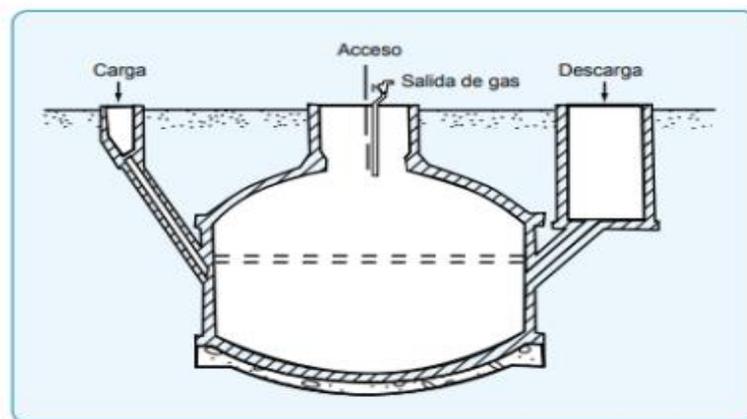


Figura 2-1. Representación del Biodigestor Modelo Chino

Fuente: FAO 2011.

- **Biodigestor Tubular o planta balón**

El biodigestor tubular se compone de material plástico que puede ser polietileno, PVC, plastilona y una combinación de éstos, está completamente sellado a la entrada y salida y sujetos directamente a las paredes del lugar de instalación. El 75% de su parte inferior almacena el volumen de la masa de fermentación y el 25% restante almacena el biogás producido. El uso de este tipo de biodigestor es recomendado en lugares donde predominan temperaturas altas y constantes (Arboleda y Gonzáles, 2009, p.9).

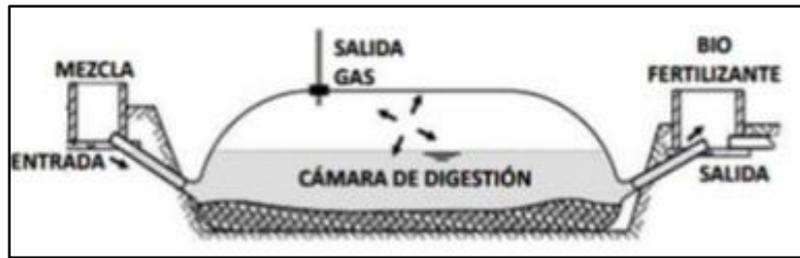


Figura 3-1. Representación del Biodigestor tubular o de flujo pistón

Fuente: FAO 2011.

Tabla 1-1: Ventajas y Desventajas de los diferentes Modelos de Biodigestores

Modelo de Biodigestor	Ventajas	Desventajas
B. campana flotante	<ul style="list-style-type: none"> - Mampostería de larga vida útil, en estructuras de concreto es necesario proteger ante la corrosión producida por la materia orgánica y el biogás. - Presión de gas constante. - Fácil manipulación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de construcción de la campana elevado. - Cuando campana es metálica necesita tratamientos para evitar la corrosión, lo cual aumenta costos de mantenimiento y operación.
B. Campana fija	<ul style="list-style-type: none"> - Vida útil aproximada de 20 años. - No posee partes móviles y/o metálicas expuestas a oxidación. - Costos de construcción más bajos que el biodigestor tipo hindú. 	La presión de gas no es constante y puede ser elevada por lo que la cúpula debe ser sellada e impermeabilizada para evitar escapes de gas.
B. tubular	<ul style="list-style-type: none"> - El material de construcción es de fácil transporte e instalación. - La disposición horizontal es apropiado para lugares con nivel freático alto. - Bajo costo de construcción y operación. 	- Las presiones generadas por el gas son bajas.

Fuente: García, 2015.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

1.5.1.3. Componentes de un biodigestor

Según Moreno (2016), los componentes más representativos de un biodigestor son los siguientes:

- **Carga:** es el lugar que permite alimentar al biodigestor con la materia orgánica
- **Cámara de digestión:** es la parte media del biodigestor donde se ejecutan los procesos bioquímicos para la transformación de la materia orgánica introducida en biogás y abono orgánico.

- Domo de biogás: es la parte de almacenamiento de biogás producido en el proceso de fermentación, es importante construir con material a prueba de fugas.
- Salida de los efluentes: es la parte por donde se descarga mediante la presión hidráulica los líquidos (Biol) y lodos digeridos (Biosol).
- Sistema de Purificación: elimina los elementos contaminantes del biogás como son el H₂S, CO₂, H₂O, que será utilizado como combustible.
- Controladores y reguladores de presión: es importante el control constante de la presión mediante manómetros para la regulación de esta y controlar la eficiencia y seguridad de los equipos.

1.5.2. Digestión Anaerobia

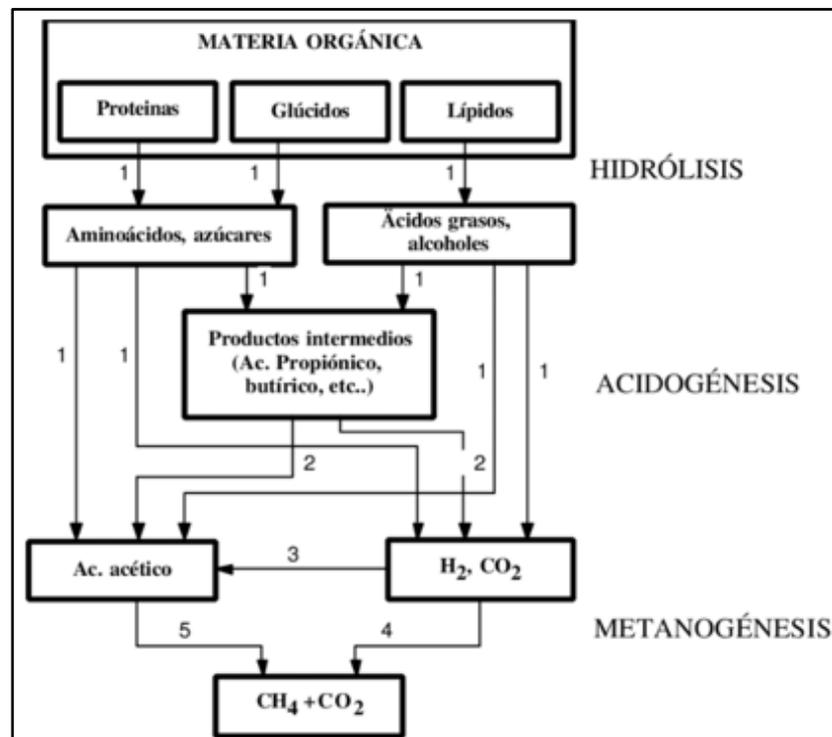


Figura 4-1. Esquema de la digestión anaerobia de materia orgánica compleja

Fuente: FAO, 2019.

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se ejecuta en ausencia estricta de oxígeno o nitratos y permite la producción de gas o combustible a partir de la descomposición de materia orgánica, mediante la participación de microorganismos. En este proceso se producen bajas cantidades de lodos, debido a que el 90% de energía producida por la oxidación directa será transformada en metano y el 10% restante de la energía se dispone para el crecimiento bacteriano. El digerido es potencialmente degradado y mediante un proceso de separación sólido-líquido podrá ser utilizado como fertilizante orgánico en la agricultura (Moreno et al., 2014, p.13).

1.5.2.1. Fases de la fermentación anaerobia

La digestión anaeróbica se caracteriza por tener tres procesos constituidos por cuatro etapas en las cuales intervienen cinco variedades de bacterias, actuando como catalizadores de los diferentes procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, constituyendo las siguientes etapas:

- **Etapa Hidrolítica**

Los compuestos orgánicos complejos (lípidos, proteínas, carbohidratos) son despolimerizados por acción de las enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y fácilmente degradables como alcoholes, aminoácidos y otros. Es un proceso enzimático extracelular y las bacterias que participan en este proceso son las bacterias hidrolítico – ácido génicas.

- **Etapa ácido génica**

Los compuestos solubles de la etapa hidrolítica toman la forma de ácidos grasos de cadena corta (ácidos acético, propiónico, butírico y valérico principalmente). En esta etapa encontraremos comúnmente bacterias de las especies: *Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias*.

- **Etapa acetogénicas**

Las bacterias acetogénicas transforman los compuestos intermedios, obteniendo como principales productos el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. El metabolismo acetogénico depende de las concentraciones de los productos mencionados. Las bacterias *Syntrophobacter wolinii* descomponen el ácido propiónico, las bacterias *Syntrophomonas wolfei* el ácido butírico y también las dos especies descomponen los ácidos valérico y butírico. Las bacterias homo acetogénicas pertenecientes a los grupos *acetobacterium*, *acetoanaerobium*, *acetogenium*, *Clostridium*, son capaces de producir ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono.

- **Etapa metanogénica**

Es la etapa final del proceso, donde compuestos como el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados a CH_4 y CO_2 . Actúan dos tipos de bacterias que degradan el ácido

acético (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y las que consumen hidrógeno (metanogénicas hidrogenófilas) (Campo, 2012, p.6).

Tabla 2-1: Bacterias presentes en las etapas metabólicas.

Fase no metanogénica		Fase metanogénica	
Anaerobios Facultativos	Anaerobios estrictos	Anaerobios extremos	
Lactobacillus	Bacteroides	Methanobacterium	
Spirillum	Clostridium Bifidobacterium	Methanococcus Methanospirillum	
Klebsiella	Sphaerophorus Fusobacterium	Methanobrevibacter	
Actinomyces	Veillonella	Methanomicrobium	
Vibrio	Peptococcus Deulfovibrio		
Corynebacterium			
Bacillus			
Micrococcus			
Pseudomonas			
Alcaligenes			
Sarcina			
Aerobacter			

Fuente: Cuba et al., 2005.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

Tabla 3-1: Principales características de la Etapa Acidogénicas y Metanogénica.

Etapa Acidogénicas	Etapa Metanogénica
Bacterias Facultativas	Bacterias anaeróbicas estrictas
Reproducción rápida	Reproducción lenta
Baja sensibilidad a cambios de temperatura y acidez	Extrema sensibilidad a los cambios de temperatura y acidez
Productos finales: metabolitos y ácidos orgánicos	Productos finales: metano y dióxido de carbono

Fuente: FAO, 2019.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

1.5.2.2. Elementos tóxicos en la digestión anaerobia

Los inhibidores de la digestión anaerobia son generalmente metales pesados, ion amonio y diferentes metales que llegan a ser tóxicos cuando su concentración supera los límites admitidos en el sustrato. A continuación, se presenta las concentraciones a las cuales los elementos son tóxicos:

Tabla 4-1: Elementos inhibidores en la digestión anaerobia

Elemento	Concentración (ppm)
Sodio (Na)	3500 – 5500
Potasio (K)	2500 – 4500
Calcio (Ca)	2500 – 4500
Magnesio (Mg)	1000 – 1500
Amonio (NH ₄)	1500 – 3500

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2010.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

1.5.3. Biogás

Es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros compuestos generados mediante la degradación microbiana de materia orgánica de origen vegetal o animal en condiciones anaeróbicas (Arellano et al., 2014, p.54).

El biogás se produce a partir de compuestos orgánicos complejos que se descomponen por microorganismos mediante el proceso de digestión anaerobia. La producción de biogás representa un proceso de recuperación de nutrientes y energías renovables de distintas corrientes de desechos orgánicos, lo cual ayuda a reducir el uso de combustibles fósiles y con ello las emisiones de CO₂. Puede ser utilizado como fuente renovable de energía y calor cuando sea necesario (Plugge, 2017, p.3).

El biogás industrial se obtiene mediante tres vías principales:

- Digestión anaeróbica pasiva: se recupera directamente de los vertederos (rellenos sanitarios).
- Fase de fermentación: es proveniente de las aguas residuales urbanas y de los efluentes industriales tratados en las EDAR (estaciones depuradoras de aguas residuales).
- Propósitos energéticos: producidos en plantas de digestión anaeróbica a diferentes temperaturas (mesófilas 35⁰C, termófilas 50⁰C), mediante digestores de residuos para el procesamiento de la industria agroalimentaria, basura doméstica y otros (Sierra, 2017, p.32).

1.5.3.1. Condiciones generales para la producción de biogás

La fermentación anaeróbica en ausencia de oxígeno produce metano, gracias al desarrollo de bacterias metanogénicas al contrario de la fermentación aerobia que produce dióxido de carbono. Por ello es indispensable cumplir con características básicas para la obtención de biocombustibles y fertilizantes de alta calidad.

- **Materiales de carga**

En la producción de biogás, los microorganismos metanogénicos necesitan suficiente materia orgánica para el proceso de digestión, por lo general se utiliza compuestos orgánicos y excretas de animales, esta materia prima debe ser rica principalmente en dos componentes, el primero es nitrógeno que sirve como nutriente para la formación de estructura celular y el segundo es el carbono que aporta como fuente de energía.

- **Composición del estiércol**

El ganado vacuno generalmente es alimentado con gran variedad de hierbas, por lo que se considera las excretas como un abono fresco con alto contenido de agua. Es una mezcla de alimento sin digerir, bacterias que son movilizadas desde el tracto digestivo, agua y un 80 a 85% de orina.

Las excretas contienen sustancias que son transformadas en el tracto digestivo por la actividad metabólica de las bacterias y la actividad enzimática de los jugos digestivos. Los principales elementos que contiene el estiércol son: materia orgánica, nitrógeno, fósforo, cobre y otros elementos.

Tabla 5-1: Composición del estiércol de diferentes especies animales

Nutrientes	Vacuno (%)	Gallinaza (%)	Porcino (%)	Ovino (%)
Nitrógeno	2 - 8	5 - 8	3 - 5	3 - 5
Fósforo	0.2 - 1.0	1 - 2	0.5 - 1.0	0.4 - 0.8
Potasio	1 - 3	1 - 2	1 - 2	2 - 3
Magnesio	1.0 - 1.5	2 - 3	0.08	0.2
Sodio	1 - 3	1 - 2	0.05	0.05
Sales solubles	6 - 15	2 - 5	1 - 2	1 - 2

Fuente: Salazar et al., 2003.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

Tabla 6-1: Producción de estiércol por especie

Especie	Peso Vivo	Kg estiércol / L-día	% CH ₄
Cerdos	50	4.5 - 6	65 - 70
Vacunos	400	25 - 40	65
Equinos	450	12 - 16	65
Ovinos	45	2.5	63

Aves	1.5	0.06	60
Caprinos	40	1.5	-

Fuente: Acuña, 2015.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

- **Temperatura**

La producción de biogás mediante la digestión anaerobia en un biodigestor se puede efectuar en un extenso rango de temperaturas comprendidos entre los 5°C hasta los 60°C, el crecimiento lento de las bacterias metanogénicas produce el efecto de alta sensibilidad a los cambios bruscos de temperatura, el proceso de producción de metano se ve afectado con el decrecimiento de temperatura, con la acumulación de ácidos, ya que la baja de temperatura no afecta a las bacterias acidificantes. Es importante mantener una temperatura cálida constante en el biodigestor mediante la adecuación de materiales como plásticos de invernadero y restos orgánicos para evitar posibles fallas en el funcionamiento del biodigestor para la producción del biogás (Rivas et al., 2009, p.11).

Tabla 7-1: Microorganismos presentes en la digestión anaerobia según la Temperatura

Microorganismos	Temperatura
Psicrófilos	Menor a 30°C
Mesófilos	30 – 40 C
Termófilos	50 – 60°C

Fuente: Durazno, 2018.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

- **Humedad**

Se debe considerar que el exceso o déficit de agua en la mezcla pueden ser desventajosos en la producción de biogás, por lo cual los valores favorables de la cantidad de agua en la mezcla están entre un 85 a 90% del peso total, lo que significa un 10 a 15% de los sólidos presentes en el material a descomponerse (Acuña, 2015, p.6).

- **Relación Carbono / Nitrógeno**

El carbono y nitrógeno son elementos fundamentales para la reproducción de las bacterias metanogénicas que son las productoras del biogás, durante la digestión anaerobia los microorganismos metanogénicos consumen el carbono 25 a 30 veces más rápido que el nitrógeno, por lo cual la relación adecuada está en el rango de 20:1 a 30:1. Si la relación es de 10:1 generará

una pérdida de nitrógeno, por el contrario si la relación es 40:1 se inhibe el crecimiento bacteriano por falta de oxígeno (Durazno, 2018, p.9).

La investigación presentada por (Rivas et al., 2009, p.3), manifiesta que el aumento de la proporción de nitrógeno provoca la formación de amonio, generado en la degradación anaeróbica de urea y proteínas, el mismo que actúa como inhibidor de la fermentación anaeróbica y como agente tóxico para las bacterias metanogénicas lo cual disminuye la producción de biogás.

Tabla 8-1: Relación C/N de los residuos de animales domésticos

Residuos animales	% C	% N	C/N
Bovinos	30	1.3	25:1
Equinos	40	0.8	50:1
Ovinos	35	1	35:1
Porcinos	25	1.5	16:1
Caprinos	40	1	40:1
Conejos	35	1.5	23:1
Gallinas	35	1.5	23:1
Patos	38	0.8	47:1
Pavos	35	0.7	50:1

Fuente: García y Gómez, 2016.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

- **Potencial de Hidrógeno (pH)**

El potencial de hidrógeno es un parámetro que está relacionado con el crecimiento de los microorganismos en el proceso de fermentación anaeróbica, determinando la inhibición o toxicidad de los diferentes tipos de bacterias presentes en las diferentes etapas de la digestión anaerobia.

Los valores de pH óptimo dependerán de cada etapa del proceso de digestión anaerobia, pero es importante mantener el valor cercano a la neutralidad para que el proceso sea favorable.

Durante el proceso de fermentación anaerobia. Los valores de pH pueden ser rectificadas para evitar la falla del proceso, cuando se eleva el valor del pH frecuentemente se saca una cantidad considerable de la mezcla y se añade la misma cantidad de materia orgánica fresca, cuando los valores de pH descienden es aconsejable incorporar a la mezcla cenizas, fertilizantes o agua amoniacal diluida (García y Gómez, 2016, p.16).

Tabla 9-1: Rangos de pH por etapas

Microorganismos	Valor de pH
Hidrolíticos	7.2 – 7.5
Acetogénicos	7 – 7.2
Metanogénicos	6.5 – 7.5

Fuente: Forero y Sánchez, 2017.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

Se debe tener en cuenta que los valores óptimos de pH para el proceso de digestión anaerobia están en el rango de 6.5 a 7.5 y en caso de sobrepasar los límites de 6.2 y 8.5, se provocará la inhibición de los microorganismos responsables del proceso.

- **Tiempo de retención**

Es un factor que determina el tiempo promedio de permanencia de la carga orgánica en el interior del biodigestor, la velocidad de degradación tiene relación inversa con la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso, es decir, a mayor temperatura el tiempo de retención será menor para la producción de biogás.

Tabla 10-1: Tiempo de retención del estiércol de ganado en diferentes climas.

Tiempo de retención (días)	Características
30 – 40	Clima tropical con regiones planas
40 – 60	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos
60 - 90	Clima temperado con inviernos fríos

Fuente: Delgado, 2018.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

- **Agitación**

La agitación en los biodigestores puede ser de tipo mecánica, hidráulica o neumática, los objetivos de la agitación son los siguientes:

- Proporciona contacto del sustrato fresco con la población bacteriana.
- Eliminar los metabolitos generados por las bacterias metanogénicas.
- Favorecer la salida de gases.
- Proporcionar densidad uniforme de la población bacteriana.
- Prevenir la formación de capa superficial y espumas.
- Prevenir la sedimentación en el biodigestor.
- Evitar la formación de espacios muertos que reducen el volumen efectivo del biodigestor.

- Mantener la temperatura uniforme en el reactor.

El parámetro de la velocidad de agitación es importante para conseguir un equilibrio entre la homogenización del proceso y la formación de agregados bacterianos. Una agitación con velocidad superior a 700 rpm, ocasiona la disminución ligera de la generación de biogás, por la ruptura de agregados bacterianos (Campos, 2001, p.7).

1.5.3.2. Composición del Biogás

La composición química del biogás depende directamente de las materias primas y condiciones de operación empleadas en la digestión anaerobia. El biogás tiene un poder calorífico aproximado de 5250 kcal/m³, para una concentración de metano en 60%, lo cual permite ser utilizado como una fuente de energía. El sulfuro de hidrógeno representa un problema del biogás por su efecto corrosivo en presencia de agua, por lo cual es importante eliminar la humedad del biogás o eliminar el sulfuro de hidrógeno (Marañón et al., 1998, p.26).

El biogás bruto se compone principalmente de los elementos presentados en la siguiente tabla:

Tabla 11-1: Composición química del biogás

Componente	Fórmula química	Volumen (%)
Metano	CH ₄	35 – 75
Dióxido de carbono	CO ₂	15 – 60
Vapor de agua	H ₂ O	5 – 10
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.05 – 2
Siloxanos	--	0 – 0.02
Hidrocarburos saturados y halogenados	--	Menor a 0.6
Amoníaco	NH ₃	Menor 1
Oxígeno	O ₂	0 - 1
Monóxido de carbono	CO	Menor 0.6
Nitrógeno	N ₂	0 - 2

Fuente: Sierra, 2017.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

- **Metano**

Es el principal compuesto del biogás y de él depende el poder calorífico proporcionado, es un elemento inflamable y explosivo al mezclarse con determinadas cantidades de oxígeno. Se caracteriza por ser inodoro, incoloro, no se considera tóxico, pero puede desplazar el oxígeno en lugares cerrados provocando asfixia. Representa un contaminante ambiental al aire libre ya que, tiene peso más ligero que el aire y tiende a escapar a la atmósfera representando ser 21 veces más contaminante que el CO₂.

- **Dióxido de Carbono**

Presenta características similares al metano, es incoloro, inodoro y puede producir asfixia con el desplazamiento del oxígeno que circula por el sistema respiratorio. Presenta elevada toxicidad cuando está expuesto a niveles del 1.5% en volumen por un tiempo superior a los 10 minutos.

- **Hidrógeno**

Este elemento se forma en las etapas iniciales del proceso de digestión anaerobia por el efecto de las bacterias fermentativas y acidogénicas. Se caracteriza por ser altamente inflamable ya que puede formar una mezcla explosiva con el aire en el rango de 4/74%.

- **Monóxido de carbono**

Tiene concentración considerablemente baja en el biogás y presenta como características ser inodoro e incoloro y elevada toxicidad (Safont, 2017, p.4).

Tabla 12-1: Características del biogás

CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS	
Temperatura (°C)	37 – 67
Densidad específica (t/m ³)	1.02 – 1.06
Contenido en humedad (%)	Saturado
Poder calorífico superior (kcal/m ³)	3500 - 9000

Fuente: Safont, 2017.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

1.5.3.3. Principales compuestos tóxicos del biogás

El biogás contiene elementos que son altamente tóxicos cuando están fuera de los valores admisibles, los más comunes son los siguientes:

- **Sulfuro de hidrógeno y mercaptanos**

El sulfuro de hidrógeno tiene mayor peso que el aire, se caracteriza por emanar un olor a huevo podrido y es un compuesto peligroso a bajas concentraciones para los seres humanos y animales. A medida que aumenta las concentraciones se vuelve más tóxico provocando desde irritaciones de las vías respiratorias, irritación de los ojos, náuseas, vómitos hasta la muerte.

El H₂S y mercaptanos producen corrosión en los equipos y con un valor superior a 1.000 mg/Nm³, disminuyen el período útil del aceite de motor, lo cual provoca un riesgo en el sistema de combustión interna del equipo utilizado. Con la combustión efectuada se forma elementos (SO₂ y SO₃) de mayor toxicidad que el H₂S y más corrosivos en presencia de agua.

Tabla 13-1: Límites de concentración del H₂S y mercaptanos

Compuesto	Concentración (ppm)	Efectos
H ₂ S	0.03-0.15	Olor a huevo podrido.
	15-75	Irritación ojos, nariz, náuseas, vómitos, dolores de cabeza.
	150 - 300	Parálisis de los nervios olfatorios.
	Mayor a 375	Muerte por envenenamiento después de varias horas.
	Mayor a 750	Muerte por envenenamiento en un tiempo de 30 a 60 minutos.
	1000	Muerte por envenenamiento en pocos minutos.
Límite de exposición ocupacional: 10 ppm durante 8 horas al día		
Valor umbral límite: 10 ppm		

Fuente: Sierra, 2017.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

- **Compuestos halogenados**

En la combustión interna de los motores se producen generalmente los compuestos orgánicos clorados que son el HCl y CO₂, el HCl tiene un efecto corrosivo elevado, debido a la acidificación del aceite lubricante. Los efectos negativos del biogás se manifiestan en concentraciones totales de cloro sobre el valor de 50 mg/Nm³.

- **Amoníaco (NH₃)**

El amoníaco es un gas tóxico con olor picante y lacrimógeno y tiene un peso más ligero que el aire. Los NO_x, son producidos en los procesos de combustión de quemadores o motores a gas. La producción de amoníaco en concentraciones bajas durante el proceso de digestión anaerobia es necesario para algunos microorganismos, pero en concentraciones elevadas causa un efecto inhibitor. El valor de 20-35 mg/m³ de amoníaco en el aire libre, representa la concentración inocua representando el límite máximo admisible.

- **Los siloxanos**

Son compuestos que tienen en su estructura molecular el enlace Si-O y radicales orgánicos unidos al átomo de silicio. Se caracterizan por tener alta compresibilidad, estabilidad térmica, inflamables, tensión superficial, toxicidad, biodegradabilidad y son repelentes al agua. Están presentes en el biogás en forma cíclica o lineal.

Los siloxanos provocan la abrasión en la superficie interior de los motores por lo cual los valores máximos establecidos por los fabricantes de motores son de 0,03 mg/m³ (microturbinas) a 28 mg/m³ (Caterpillar) establecen los valores máximos de siloxanos (Sierra, 2017, p.3).

1.5.3.4. Fuentes para la producción de biogás

Barrena y Maieelo (2018), mencionan que el biogás se produce de manera natural a partir de las siguientes fuentes:

- Vegetación: mediante la descomposición de la materia vegetal se libera gas metano.
- Cultivos sumergidos: mediante las plantaciones de arroz y totorales.
- Pantanos y humedales: mediante la putrefacción de la vegetación en su fondo.
- Estiércol de animales: comúnmente son animales de granja como: vacuno, ovino, equino, cerdos, pollos, cuyes, que mediante la descomposición del estiércol produce metano.
- Desagües: mediante el tratamiento en digestores anaeróbicos para la producción de metano.
- Relleno sanitario: se produce metano mediante la descomposición de materia orgánica.

1.5.3.5. Aplicaciones del Biogás

La producción de biogás generalmente es procesada a partir del tratamiento de residuos, lo cual permite la eliminación de desechos, contribuyendo a la sostenibilidad de la calidad ambiental,

generando una cantidad de energía limpia que contribuye la reducción y compensación de la huella de carbono.

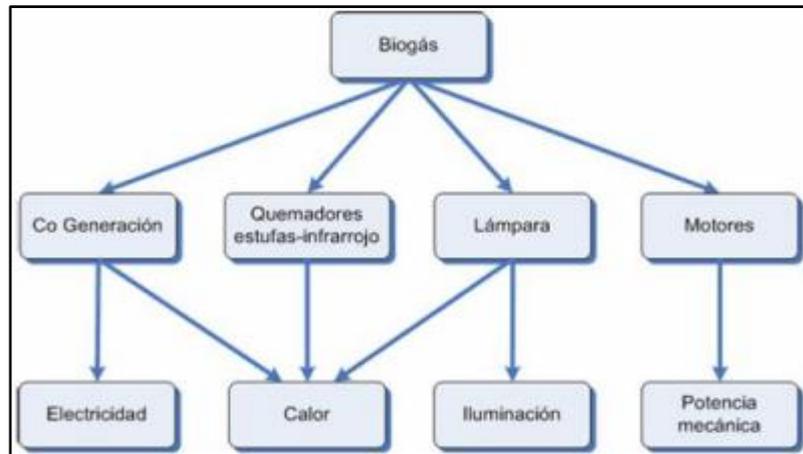


Figura 5-1. Diferentes Aplicaciones del biogás

Fuente: Acuña, 2015.

Mediante la implementación de la tecnología de energía y calor, el biogás puede ser utilizado como generador de electricidad y calor. El calor producido por el biogás, generalmente se utiliza en procesos industriales, actividades agrícolas (secado de cultivos, astillas de madera), procesos de calefacción, en sistemas combinados de potencia-calor-refrigeración y combustible para el transporte (Mudhoo, 2012, p.8).

Tabla 14-1: Equivalencias de 1m³ de biogás con otros combustibles

1m ³ de Biogás equivale a:	
Carbón vegetal	0.8 kg
Leña	1.5 kg
Diésel	0.55 L
Gasolina	0.61 L
GLP	0.45 kg
Alcohol carburante	0.81 L
Carbón mineral	0.74 kg

Fuente: Acuña, 2015.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

La purificación del biogás permite la reducción de los gases de efecto invernadero y genera beneficios ambientales al ser utilizado como combustible vehicular, debido a que emite cantidades bajas de óxido de nitrógeno, monóxido de carbono y nitrógenos, en comparación con

las cantidades producidas por los hidrocarburos utilizados generalmente como la gasolina y diésel.

También se puede mencionar que entre las ventajas del uso de biogás como combustibles en motores está la disminución de ruido en comparación con los motores que usan diésel como combustible y último la disminución del impacto ambiental generado ante los posibles derrames o fallas de los motores.

La desventaja en el uso del biogás como combustible está en el valor de su purificación y limpieza.

Tabla 15-1: Descripción de las Aplicaciones del Biogás

Usos	Descripción
Cocina a biogás	Se considera un combustible ecológico para la cocción de alimentos, arde con llama azul, no tizna ni tampoco humea. Según experimentos realizados en Santo Tomás, provincia de Luya – Perú, se obtuvo resultados en los cuales la producción de biogás sirvió para el funcionamiento de una cocina con 2 hornillas, durante 5 horas al día.
Lámpara a biogás	Las lámparas que funcionan a base de gas propano se pueden modificar para el funcionamiento mediante biogás, lo cual es útil para la iluminación de viviendas en el sector rural.
Motores a biogás	El uso de biogás previo a la eliminación de Sulfuro de hidrógeno y vapor de agua puede ser empleado como combustible de motores a combustión interna a petróleo. Se debe tener en cuenta que la combustión del petróleo en los cilindros se da a una elevada compresión, por lo cual no se puede reemplazar el petróleo por el biogás en su totalidad.
Calefacción a biogás	Se puede sustituir la alimentación de combustibles fósiles por biogás para el funcionamiento de las máquinas de calefacción para la producción de calor y sus diferentes usos.

Fuente: Barrena y Maicelo, 2018.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

1.5.3.6. Almacenamiento del biogás

Los sistemas de almacenamiento de gas se emplean para moderar las variaciones de producción de biogás la calidad y el consumo, debido a que en ocasiones no se produce la cantidad necesaria

en el momento adecuado para su uso. El componente de almacenamiento permite la generación de una presión constante en los equipos alimentados con biogás para la producción energética. A continuación, se mencionan los diferentes tipos de almacenamiento:

- **Uso directo**

El uso directo de biogás se da en situaciones donde existe equilibrio en el lugar de producción y el uso de este, en estos casos se usa un regulador de presión en la línea de gas para asegurar el funcionamiento óptimo del quemador o convertidor de gas. Este tipo de almacenamiento es bajo en costos, pero no es frecuente encontrar sistemas lo suficientemente óptimos entre la producción y el uso de biogás que eviten la quema de los residuos de este.

- **Almacenaje de baja presión**

El almacenamiento a baja presión con un valor de 0.36 psi es el más exitoso, los recipientes para ello pueden ser costosos, pero este tipo de almacenamiento representa el menor costo de operación ante cualquier otro tipo de almacenamiento. El biogás se almacena entre el nivel del líquido y la tapa superior del biodigestor, la superficie puede ser flotante o flexible. Este diseño necesita mayor atención en el aislamiento del techo y la protección ante cargas de viento para evitar las fallas en su operación.

- **Almacenaje de media presión**

Estos tanques de almacenamiento son menos costosos que los de baja presión, pero los requisitos para la compresión (presión menor a 200 psi, el H₂S del biogás debe ser previamente depurado y posteriormente comprimido en depósitos como los usados en gas propano) y su limpieza los hacen más costosos. El biogás almacenado en estos tanques posee una densidad de energía más alta que en un sistema de baja presión, por lo cual el mismo volumen de biogás almacenado en un sistema a baja presión se puede almacenar en un recipiente de menor tamaño de almacenaje a media presión, pero representa un potencial energético mayor.

- **Almacenaje de alta presión**

Este almacenamiento retiene la presión entre los valores de 2000 – 5000 psi, son utilizados en lugares limitados de instalación y donde se necesitan densidades de energías bien altas. Por lo general estos tanques de almacenamiento están contruidos en material de acero y se requiere de

una seguridad estricta. El coste de los recipientes es bajo, pero los costes totales son altos y limitados como por ejemplo en las instalaciones para combustibles vehiculares o la venta de metano puro.

- **Almacenaje por absorción**

En este tipo de almacenamiento el metano se disuelve en propano lo cual incrementa de 4 a 6 veces la cantidad de gas almacenado a una presión definida. Este tipo de almacenamiento aún no está aprobado y algunos investigadores proponen que esta técnica necesita refrigeración. Se considera una técnica cara por la necesidad de eliminación de H₂S, CO₂ y vapor de agua, por lo que se utiliza únicamente en casos especiales.

- **Licuefacción**

La licuefacción del biogás se efectúa a temperatura de -50,56⁰C a presión atmosférica, no puede existir presencia de CO₂, porque que se solidifica a -23.89⁰C y las trazas de impurezas a temperaturas bajas pueden ocasionar problemas. Los cambios de presión pueden aumentar la temperatura de licuefacción, por lo que esta tecnología no es aplicable a sistemas grandes por sus elevados costos de aplicación (Sierra, 2017, p.20).

1.5.4. Base Legal

En el presente estudio se consideran los siguientes artículos:

Tabla 16-1: Texto legal

Texto Legal	Artículos
<p>Constitución de la República del Ecuador (CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. 2008).</p>	<p>Art. 3.- Son deberes primordiales del Estado: Garantizar sin discriminación alguna el efectivo goce de los derechos establecidos en la Constitución y en los instrumentos internacionales, en particular la educación, la salud, la alimentación, la seguridad social y el agua para sus habitantes. Proteger el patrimonio natural y cultural del país.</p>
	<p>Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, <i>sumak kawsay</i>. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.</p>
	<p>Art. 71.- La naturaleza o <i>Pacha Mama</i>, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. El Estado incentivará a las personas naturales y jurídicas, y a los colectivos, para que protejan la naturaleza, y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema.</p>
	<p>Art. 73.- El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales. Se prohíbe la introducción de organismos y material orgánico e inorgánico que puedan alterar de manera definitiva el patrimonio genético nacional.</p>
	<p>Art. 317.- Los recursos naturales no renovables pertenecen al patrimonio inalienable e imprescriptible del Estado. En su gestión, el Estado priorizará la responsabilidad intergeneracional, la conservación de la naturaleza, el cobro de regalías u otras contribuciones no tributarias y de participaciones empresariales; y minimizará los impactos negativos de carácter ambiental, cultural, social y económico.</p>

	<p>Art. 409.- Es de interés público y prioridad nacional la conservación del suelo, en especial su capa fértil. Se establecerá un marco normativo para su protección y uso sustentable que prevenga su degradación, en particular la provocada por la contaminación, la desertificación y la erosión.</p>
	<p>Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.</p>
<p>Ley de Gestión Ambiental (Ambiente 2004).</p>	<p>Art. 2.- La gestión ambiental se sujeta a los principios de solidaridad, corresponsabilidad, cooperación, coordinación, reciclaje y reutilización de desechos, utilización de tecnologías alternativas ambientalmente sustentables y respecto a las culturas y prácticas tradicionales.</p>

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Lugar de estudio

La investigación se realizó en la Hacienda La Estancia ubicada en la Comunidad Chipza perteneciente a la Parroquia de Ilapo en la Provincia de Chimborazo, con localización geográfica Longitud $-78^{\circ}34'48.983''$ W, Latitud $-1^{\circ}31'23.028''$ S, altitud 3643m.s.n.m. y una temperatura promedio de 11°C .

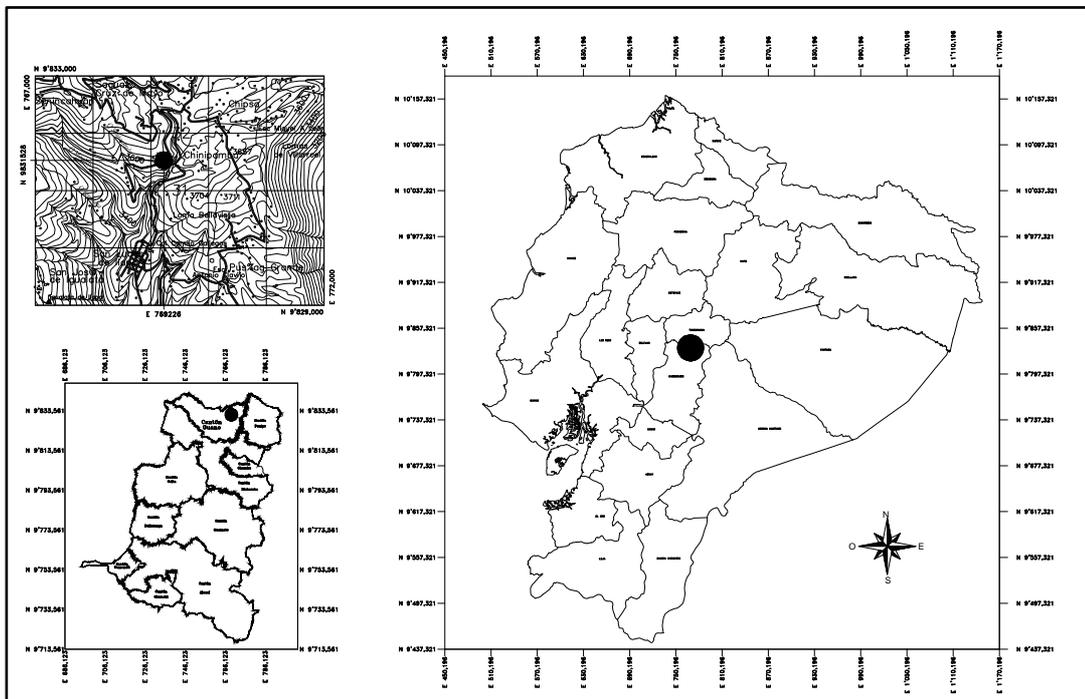


Figura 1-2. Localización Geográfica de la Hacienda “La Estancia” – Ilapo

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

2.2. Muestreo

El muestreo se realizó en la Hacienda La Estancia perteneciente a la comunidad Chipza de la Parroquia de Ilapo. Los análisis de laboratorio fueron realizados por Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos (SAQMIC) en la ciudad de Riobamba perteneciente a la Provincia de Chimborazo.

Mediante la aplicación del método de muestreo aleatorio simple se recogieron tres muestras de estiércol fresco para lo cual se utilizó una pala pequeña y fundas Ciploc para almacenarlas, se etiquetó y transportó las muestras bajo las correspondientes medidas de bioseguridad,

almacenamiento y transporte al laboratorio SAQMIC, ubicado en la ciudad de Riobamba a 75 minutos desde el punto de muestreo, para realizar los análisis fisicoquímicos que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 1-2: Parámetros analizados del estiércol de vaca de la Hacienda La Estancia

Determinaciones	Método/Técnica/Referencia
pH	Potenciométrico
Conductividad	Potenciométrico
Nitrógeno	Digestión Ácido/base, colorimetría
Carbono	Walkley Black Oxi. -Red.
Relación C/N	Cálculo

Fuente: SAQMIC, 2022.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

2.3. Elaboración de los biodigestores experimentales

La elaboración de los tres biodigestores estuvo bajo los siguientes parámetros:

Tabla 2-2: Parámetros Generales de los Biodigestores Experimental 1,2 y 3

Parámetro	Observación
Régimen	Discontinuo
Agitación mecánica	Si
Volumen del biodigestor	165 litros
Volumen final	75%
Tiempo de retención	90 días
Temperatura Ambiente promedio	11 ^o C
Mejoramiento térmico	Si

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

Para la Hacienda La Estancia-Ilapo ubicada en la zona rural-altiplano se construyeron tres biodigestores en tachos y accesorios de tubería PVC con capacidad de 165 litros, la carga de los biodigestores fue de tipo discontinua que es la más indicada para diseños experimentales y debido a la distancia hacia el sector de estudio. Se registró el monitoreo de los parámetros para la producción de biogás durante 90 días.

El mejoramiento térmico en el área de instalación de los biodigestores contribuyó a evitar la acumulación de agua proveniente de las precipitaciones constantes que se presentaron durante el

tiempo de estudio del presente proyecto y el aislamiento con plástico de invernadero ayudó a conservar la temperatura del día para evadir las bajas temperaturas de la madrugada que llegaron a disminuir en valores bajo 0 °C hasta -2 °C aproximadamente.

2.3.1. Procedimiento

- Para la boca de carga, mediante el uso del taladro se perforó la tapa en la parte superior izquierda de la tapa creando el agujero donde se insertó la unión para el paso del tubo de PVC de 2 pulgadas, que fue ubicado a una distancia de 1/6 de la altura total del tanque.
- Para la boca de descarga, se perforó un agujero en la parte lateral media del tacho en donde se colocó la unión para el paso del tubo PVC de ¾ pulgadas.
- Para el Agitador, se perforó la tapa en la parte superior media del tanque donde se colocó la unión para el paso del tubo de ¾ pulgadas que funciona como la tubería camisa. Por medio de la tubería camisa se introdujo la tubería de ½ pulgada en la cual se armó las aspas a partir una cruceta de ½ pulgada donde fueron soldadas en sus extremos las paletas para la agitación. El agitador se apoyó en la base inferior del tacho sobre una T de ¾ de pulgada que fue fijada mediante 2 abrazaderas de ¾ de pulgadas. En el apéndice superior del agitador se formó una manivela para facilitar el movimiento del agitador.
- Para la Salida de gas, se perforó la tapa en la parte superior derecha del tacho, donde se colocó la unión para el paso de la tubería de ½ pulgada. En la parte externa se colocó un codo de ½ pulgada donde se unió la llave de salida del gas y el manómetro para el control de la presión.
- Una vez terminado el ensamblaje de los biodigestores, se sellaron todos los bordes de los agujeros realizados con pegamento de tubería PVC y silicona para evitar cualquier tipo de fuga.

2.4. Adaptación del lugar para la instalación de los biodigestores

La zanja para instalar los biodigestores se ubicó a una distancia de 5m del cuarto de cocina para evitar la pérdida de presión en la salida del biogás y minimizar los costos de la tubería para la instalación.

Mediante la excavadora manual, pala y azadón, se perforó una zanja de 210 cm de largo, 60cm de ancho y 80 cm de profundidad, para la instalación de los tres biodigestores. Las paredes y piso de la zanja fueron cubiertas con plástico de invernadero para evitar la filtración del agua y generar aislamiento térmico. Alrededor de los bordes superiores de la zanja se construyó una cubierta a base de madera a una altura de 80 cm desde la superficie, la misma que fue cubierta con plástico negro para evitar la acumulación del agua proveniente de las lluvias constantes del sector y

también con la finalidad de aprovechar la propiedad de los plásticos negros para la atracción del calor mediante la luz solar.

2.5. Instalación de los biodigestores

Los tres biodigestores fueron colocados en la zanja a una distancia horizontal de 10 cm entre ellos. Se revisó que el fondo del piso esté nivelado para su correcto posicionamiento y asegurar la distribución equilibrada de la mezcla orgánica. Después de introducirlos en la zanja, se rellenó los espacios vacíos con pajilla y tamo para producir aislamiento térmico y reducir la incidencia directa de la temperatura ambiente. Después se cubrió el área de instalación con el plástico negro colocado en la cubierta superior y se revisó al máximo el aislamiento de todo el entorno de instalación.

2.5.1. Determinación de la carga diaria de estiércol

Para determinar la carga diaria del biodigestor, se obtuvo el promedio de la cantidad de estiércol generado a partir de una muestra aleatoria simple conformada por 10 vacas de raza Holstein del total de 50 vacas durante 7 días en los horarios de ordeño correspondientes a las 7am y 3pm. Durante los horarios mencionados se acorraló a las vacas seleccionadas y utilizando como herramientas pala, balanza colgante y balde de 10 litros se recogió y pesó las excretas para registrar los datos y utilizarlos en los cálculos correspondientes.

Tabla 3-2: Datos del ganado bovino – muestra aleatoria simple

Arete (#)	Raza	Peso (kg)
150918	Holstein	533
141117	Holstein	563
502	Holstein	526
1533	Holstein	518
17108	Holstein	548
372	Holstein	526
181117	Holstein	534
732	Holstein	561
83	Holstein	536
211	Holstein	547

Fuente: Hacienda “La Estancia”, 2022.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

2.5.2. Preparación del sustrato

La materia orgánica utilizada en la carga del biodigestor debe ser fresca para evitar que contenga baja carga orgánica, el contenido insuficiente de agua inhibe la interacción bacteriana y los otros microorganismos presentes en la producción de biogás, por lo cual la cantidad generada será baja, mientras que, una mezcla con exceso de agua puede ocasionar la digestión incompleta de poca materia orgánica produciendo una generación de biogás limitada y a largo tiempo.

Para la preparación del sustrato se recolectó el estiércol producido por las 50 vacas durante los dos horarios de ordeño en un día, lo cual fue suficiente para abastecer la carga de los tres biodigestores al mismo tiempo.

El Biodigestor N.1 fue considerado como la muestra patrón con una mezcla de estiércol-agua en proporción 1:2, es decir, 2 kilogramos de agua por cada kilogramo de estiércol

En los biodigestores 2 y 3 se les añadió melaza como se indica en la Tabla 3-2, para comprobar los efectos en la generación de biogás ante la muestra patrón.

La mezcla se hizo directamente en cada uno de los biodigestores para lo cual se utilizó una pala y balde de 10 litros para medir la cantidad de agua y estiércol y una jarra de 1 litro en la cual se midió el volumen de melaza que fue añadida al biodigestor 2 y 3. Para finalizar se agitó la solución hasta obtener una mezcla homogénea libre de grumos y elementos que puedan afectar al proceso de la biodigestión anaerobia.

Tabla 4-2: Materia orgánica contenida en el sustrato

	BIODIGESTOR 1	BIODIGESTOR 2 (6%)	BIODIGESTOR 3 (3%)
AGUA	82 kg	78 kg	80 kg
EXCRETAS	42 kg	39 kg	40 kg
MELAZA		7 kg	4 kg
Fecha de carga de los biodigestores: 15 enero 2022			
Tiempo de retención (Zona Altiplano): 60 – 90 días			

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

2.6. Monitoreo de la temperatura

La temperatura es un parámetro importante relacionado al tiempo de retención, a mayor temperatura disminuirá el tiempo de retención y a menor temperatura aumentará el tiempo de retención. También es importante tener en cuenta que los microorganismos responsables de la digestión anaerobia son altamente susceptibles a los cambios bruscos de temperatura.

El monitoreo de temperatura se realizó con termómetros digitales que fueron colocados en cada biodigestor y un termómetro digital que se colocó en el área de instalación para registrar la temperatura ambiente. Los valores de temperatura fueron registrados en tres horarios, 7:00am, 12:00am y 6:00 pm durante los 90 días, para lo cual se tuvo la colaboración de los vaqueros encargados de la administración de la Hacienda.

2.7. Monitoreo del pH

Los valores de pH reflejan la actividad enzimática microbiana, se debe considerar que el rango adecuado de pH para la digestión anaerobia esta entre 6.5 y 7.5, con un valor recomendable de 7. También, se debe tener en cuenta que los valores de pH menores a 6.2 y mayores a 8.5, provocarán la inhibición en el proceso de producción de biogás.

El monitoreo de pH se realizó cada 6 a 8 días mediante el uso del papel indicador que fue sujetado a una varilla con cinta adhesiva para ser introducido en la boca de carga del biodigestor y registrar los valores correspondientes basándonos en la escala colorimétrica.

2.8. Prueba de la probeta

Esta prueba se realizó luego de 8 días posteriores a la carga del sustrato con cierre hermético durante un lapso de 6 a 8 días, para lo cual se utilizó una probeta plástica de 1 litro, la manguera de salida del biodigestor y un recipiente plástico. Para medir el volumen de biogás generado se introdujo un extremo de la manguera en la probeta llena de agua e invertida sobre el recipiente plástico con agua y luego se abrió la válvula de salida de gas. En el biodigestor 2 y 3 que se generó biogás se produjo el desplazamiento de cierta cantidad de agua desde el interior de la probeta hacia el recipiente, lo cual indica la cantidad de biogás producido.

2.9. Prueba de flama

La prueba de flama se realizó en el biodigestor 2 al día 16 posterior a la carga, se procedió a encender un fósforo en el extremo de la manguera colocada en la boquilla de salida del biogás al momento de abrir la válvula de salida, ante lo cual se observó una llama de fuego de tamaño diminuto y color rojizo lo que evidencia poco volumen de biogás y bajo contenido de metano.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Etapa Preliminar

Durante la etapa preliminar, se realizó el análisis físico-químico del estiércol del ganado bovino de la Hacienda La Estancia para conocer las condiciones iniciales de los parámetros más representativos en el proceso de la digestión anaerobia, con la finalidad de crear las condiciones apropiadas para el crecimiento microbiano y con ello la producción de biogás.

3.1.1. Análisis Físico - Químico del Estiércol

Tabla 1-3: Características del estiércol del ganado bovino de la Hacienda “La Estancia”

Determinaciones	Unidades	Resultados	Método/Técnica/Referencia
pH	-	6.76	Potenciométrico
Conductividad	uS/cm	4.19	Potenciométrico
Nitrógeno	%	0.95	Digestión Ácido/base colorimetría
Carbono	%	44.56	Walkley Blak Óxid-Red
Relación C/N	-	47.01	Cálculo

Fuente: SAQMIC, 2022.

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

Según (Lorenzo y Obaya 2005), el pH óptimo en el proceso de digestión anaerobia es de 7 y como se indica en la tabla 9-1 los diferentes microorganismos presentes en las distintas etapas del proceso se desarrollan en un rango de pH que va desde 5.5 a 7.5, por lo cual se determina que el valor inicial de pH de 6.76 que fue analizado mediante el método potenciométrico en el laboratorio SAQMIC es favorable para que se efectúe el proceso de digestión anaerobia evitando adicionar alguna sustancia o elemento que ayuden a contrarrestar la alcalinidad o acidez.

El valor de la relación C/N (45:1) presenta un valor elevado en relación al valor óptimo (25:1) mencionado en (FAO 2011), teniendo en cuenta que un valor elevado produce deficiencia de nutrientes para el crecimiento bacteriano y un valor bajo puede ser inhibidor de la metanogénesis por las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal, se aplicó el cálculo de la dilución a partir de la relación propuesta en (Cuvi, 2015, p.2):

$$\frac{C/N \text{ obtenido}}{C/N \text{ óptimo}} = \frac{47}{25} = 1.88 \approx 2$$

El resultado de este cálculo indica que el factor de dilución para la carga inicial es igual a 2 veces, determinando una mezcla con relación 1:2 estiércol-agua, lo que significa que se mezclará 2 kg de agua por cada 1 kg de estiércol.

3.1.2. Cálculo de la cantidad de biogás consumido por la Hacienda La Estancia

En la Hacienda La Estancia se utiliza gas GLP principalmente para calentar agua, que es utilizada para el aseo de las ubres de las vacas durante el ordeño por motivos de higiene durante la actividad.

La cantidad consumida al mes es de 4 bombonas de gas GLP al mes. Para estimar la cantidad de biogás necesario en reemplazo del uso de gas GLP para las actividades de la Hacienda, se ha realizado la transformación con el factor de conversión presentado en (Acuña, 2015, p.5).

3.1.2.1. Cantidad de gas GLP en m³ de biogás

$$1 \text{ tanque de GLP} = 15 \text{ Kg}$$

$$4 \times 15 = 60 \text{ Kg de GLP/ mes}$$

$$\text{Cantidad de biogás mensual} = \frac{60 \text{ kg GLP}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{0.45 \text{ kg GLP}}$$

$$\text{Cantidad requerida de biogás al mes} = 133.3 \text{ m}^3 \text{ biogás / mes}$$

3.2. Cálculos de Diseño del Biodigestor

3.2.1. Cálculo de la cantidad de estiércol producido al día

Los datos fueron recolectados a partir de la muestra seleccionada de 10 vacas raza Holstein, durante 7 días, en los horarios de ordeño correspondientes a las 7am y 3pm.

Tabla 2-3: Estiércol diario producido por el ganado bovino de la Hacienda La Estancia

# Arete	Día 1 (Kg)	Día 2 (Kg)	Día 3 (Kg)	Día 4 (Kg)	Día 5 (Kg)	Día 6 (Kg)	Día 7 (Kg)	Promedio (Kg)
150918	7.5	7.0	6.5	7.5	6.0	6.5	6.5	6.79

141117	7.5	7.0	7.0	6.5	7.0	6.5	6.0	6.79
502	7.0	7.5	6.5	7.0	7.5	7.0	7.0	7.07
1533	7.5	7.0	7.5	6.5	6.5	6.5	6.0	6.79
17108	6.5	6.5	7.0	7.5	6.5	5.5	6.0	6.50
372	6.5	6.0	5.5	7.0	7.5	6.5	6.0	6.43
181117	6.5	5.5	6.5	6.0	6.0	7.0	6.0	6.21
732	7.5	7.0	6.5	5.5	6.0	7.0	6.0	6.50
83	7.5	6.5	7.0	6.0	7.5	6.0	6.0	6.64
211	6.5	7.0	6.0	7.0	6.5	7.0	5.5	6.50
Promedio de la producción de estiércol-vaca/día								6.6

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

Mediante los valores registrados en la tabla 3-4, se obtuvo un valor promedio de 6,6 kg de estiércol producido al día por cada vaca, este valor es necesario para calcular la cantidad total de estiércol producido por las 50 vacas disponibles en la Hacienda La Estancia.

Ecuación 2-3

$$C_{ed} = \text{Promedio estiércol-vaca/día} * N. \text{ total de vacas}$$

$$C_{ed} = (6.6 \text{ Kg /día -vaca}) \times 50 \text{ vacas}$$

$$C_{ed} = 330 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{Día}} \right)$$

Donde:

C_{ed} : cantidad de estiércol diario - por las 50 vacas disponibles en la Hacienda.

En la Hacienda La estancia se produce la cantidad de 330 kg de estiércol al día por el total de las 50 vacas, lo que se considera una gran cantidad de materia orgánica para ser procesada y obtener biogás y biol. De lo contrario, al no tener un tratamiento adecuado para su disposición final representa un medio de contaminación ambiental del sector.

3.2.2. Cálculo de la dilución del sustrato inicial

La mezcla estiércol-agua tuvo una relación 1:2 de acuerdo al cálculo realizado en la Ecuación (1) a partir de los valores de laboratorio y la relación propuesta en (Chillo Abril y Paguay Cuvi 2015).

3.2.3. Biodigestor experimental 2

3.2.3.1. Carga Diaria B. Exp. 2

El sustrato de alimentación se determina de acuerdo a la relación de la mezcla estiércol-agua (1:2), se aplica

Ecuación 3-3

$$C_d = C_{ed} \text{ (Kg/día)} + H_2O \text{ (Kg/día)}$$
$$C_d = 330 \left(\frac{Kg}{Día}\right)_{\text{estiércol}} + 2 (330) \text{ (Kg)}_{\text{agua}}$$
$$C_d = 990 \left(\frac{Kg}{Día}\right)$$

Donde:

C_d : carga diaria de del biodigestor.

El biodigestor experimental 2 tendrá una carga diaria 990 kg/día, del sustrato formado por la mezcla de excretas y agua en dilución 1:2.

3.2.3.2. Volumen Líquido B. Exp. 2

El volumen líquido ocupará el 75% del volumen total del biodigestor. Para calcular el volumen líquido del biodigestor se toma en cuenta el tiempo de retención que es el tiempo de permanencia del sustrato en el interior del biodigestor para la degradación máxima de materia orgánica, el cual fue de 30 días.

Ecuación 4-3

$$V_L = C_d \times T_R$$
$$V_L = 990 \frac{Kg}{día} \times 30 \text{ días}$$
$$V_L = 29700 \text{ Kg}$$
$$V_L = 29.7m^3$$

Donde:

V_L : volumen líquido del biodigestor

C_d : carga diaria del biodigestor

T_R : tiempo de retención

3.2.3.3. Volumen Gaseoso B. Exp. 2

El biodigestor acumula en su parte superior el 25% de la fase gaseosa. Para el cálculo se aplica

Ecuación 5-3

$$V_G = \left(\frac{0.25}{0.75}\right) \times V_L$$
$$V_G = \left(\frac{0.25}{0.75}\right) \times 29.7 \text{ m}^3$$
$$V_G = 9.9 \text{ m}^3$$

Donde:

V_G : volumen gaseoso del biodigestor

3.2.3.4. Volumen Total del B. Exp. 2

Para el cálculo del Volumen Total del Biodigestor se aplica la

Ecuación 6-3

$$V_{TB} = V_L + V_G$$
$$V_{TB} = (29.7 + 9.9) \text{ m}^3$$
$$V_{TB} = 39.6 \text{ m}^3$$

Donde:

V_{TB} : Volumen total del biodigestor fase líquida y gaseosa

3.2.3.5. Dimensionado del B. exp. 2

En base al volumen del biodigestor experimental 2, se procede a calcular el resto de las dimensiones del biodigestor. El cálculo de la longitud y radio del biodigestor nos sirve para estimar la longitud necesaria para producir el volumen total deseado.

En el cálculo del diámetro se consideró un diámetro (d) igual a la profundidad (h), basándose en el principio utilizado en la Tesis “Diseño de un Biorreactor y Conducción del Biogás Generado por las Excretas de Ganado Vacuno, Estación Tunshi-Espoch”, propuesto por el Ing. Edwin Toala (2013), De la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, facultad de Ciencias.

Si, $h = d$

Aplicamos:

Ecuación 7-3

$$V = \frac{(\pi d^2)}{4} \times h$$

Donde:

V: Volumen total del biodigestor

d: diámetro del biodigestor

h: altura del biodigestor

Reemplazando h por d:

Ecuación 8-3

$$d = \sqrt[3]{\frac{V \times 4}{\pi}}$$
$$d = \sqrt[3]{\frac{(39.6m^3) \times 4}{\pi}}$$
$$d = 3.69 \text{ m}$$

En base a lo calculado, tenemos que un biodigestor de volumen $39.6m^3$, será un pozo de 3.69 m de diámetro y 3.69 m de profundidad.

Tomando en cuenta que, la relación de altura diámetro del pozo no es necesariamente 1 a 1, calculamos la profundidad del pozo para el mismo biodigestor con capacidad volumétrica de $39.6m^3$, asignando un diámetro de 3.54m, tomando en cuenta el espesor del material del biodigestor de 0,15 cm. Aplicamos la

Ecuación 9-3

$$V = \frac{(\pi d^2)}{4} \times h$$

Despejamos h, y obtenemos

Ecuación 10-3

$$h = \frac{V \times 4}{\pi d^2}$$
$$h = \frac{(39.6m^3) \times 4}{\pi (3.54m)^2}$$
$$h = 4.02 \text{ m}$$

Con los datos obtenidos mediante los correspondientes cálculos se obtuvo las siguientes medidas del biodigestor:

d = 3.54 m diámetro

h = 4.02 m altura

A partir de los datos obtenidos del digestor experimental 2, se diseña un biodigestor de diámetro 3.54m y altura 4.02m, con capacidad de 39.6 m³, que producirá la cantidad 9.9 m³ de biogás a partir de una carga diaria de sustrato de 990 kg y tendrá 29.7m³ de volumen líquido para ser utilizados como abono orgánico.

Los cálculos de diseño se obtuvieron a partir del biodigestor 2 en el cual se añadió el 6% de melaza del volumen total del sustrato, lo cual se interpreta que para la obtención de 9.9 m³ de biogás en un biodigestor de volumen 39.6m³, se necesitaría la adición de 1782 litros de melaza que tiene un costo aproximado de \$891 dólares estadounidenses americanos que representa un gasto elevado para su implementación por lo cual no se consideraría rentable.

3.2.4. Biodigestor experimental 3

3.2.4.1. Carga Diaria B. Exp. 3

El sustrato de alimentación se determina de acuerdo a la relación de la mezcla estiércol-agua (1:2), se aplica la

Ecuación 11-3

$$\begin{aligned}C_d &= C_{ed}(\text{L/día}) + \text{H}_2\text{O} (\text{L/día}) \\C_d &= 330 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{Día}}\right)_{\text{estiércol}} + 2 (330) (\text{Kg})_{\text{agua}} \\C_d &= 990 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{Día}}\right)\end{aligned}$$

3.2.4.2. Volumen Líquido B. exp. 3

El tiempo de retención para este cálculo fue de 17 días, se aplica

Ecuación 12-3

$$\begin{aligned}V_L &= C_d \times T_R \\V_L &= 990 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \times 17 \text{ días} \\V_L &= 16830 \text{ Kg} \\V_L &= 16.83 \text{ m}^3\end{aligned}$$

3.2.4.3. Volumen gaseoso B. exp. 3

El biodigestor acumula en su parte superior el 25% de la fase gaseosa. Para el cálculo se aplica la

Ecuación 13-3

$$\begin{aligned}V_G &= \left(\frac{0.25}{0.75}\right) \times V_L \\V_G &= \left(\frac{0.25}{0.75}\right) \times 16.83 \text{ m}^3 \\V_G &= 5.61 \text{ m}^3\end{aligned}$$

3.2.4.4. Volumen Total B. exp. 3

Para este cálculo se aplica la

Ecuación 14-3

$$\begin{aligned}V_{TB} &= V_L + V_G \\V_{TB} &= (16.83 + 5.61) \text{ m}^3 \\V_{TB} &= 22.4 \text{ m}^3\end{aligned}$$

3.2.4.5. Dimensionado del B. exp. 3

Para el dimensionamiento del biodigestor 3 se aplica la

Ecuación 15-3

$$\begin{aligned}d &= \sqrt[3]{\frac{V \times 4}{\pi}} \\d &= \sqrt[3]{\frac{(22.4 \text{ m}^3) \times 4}{\pi}} \\d &= 3.05 \text{ m}\end{aligned}$$

En base a lo calculado, tenemos que un biodigestor de volumen 22.4m³, será un pozo de 3.05 m de diámetro y 3.05 m de profundidad.

Tomando en cuenta que, la relación de altura diámetro del pozo no es necesariamente 1 a 1, calculamos la profundidad del pozo para el mismo biodigestor con una capacidad volumétrica de 22,4 m³, asignando un diámetro de 2.9 m, tomando en cuenta el espesor del material del biodigestor de 0,15 cm. Aplicamos la

Ecuación 16-3

$$h = \frac{V \times 4}{\pi d^2}$$
$$h = \frac{(22.4 \text{ m}^3) \times 4}{\pi (2.9 \text{ m})^2}$$
$$h = 3.39 \text{ m}$$

Con los datos obtenidos mediante los correspondientes cálculos se obtuvo las siguientes medidas del biodigestor:

d = 3.05 m diámetro

h = 3.39 m altura

A partir de los datos obtenidos del digestor experimental 3, se diseña un biodigestor de diámetro 3.05m y altura 3.39m, con capacidad de 22.4 m³, que producirá la cantidad 5.61 m³ de biogás a partir de una carga diaria de sustrato de 990 kg y tendrá 16.83m³ de volumen líquido para ser utilizados como abono orgánico.

Los cálculos de diseño se obtuvieron a partir del biodigestor 3 en el cual se añadió el 3% de melaza del volumen total del sustrato, lo cual se interpreta que para la obtención de 5.61 m³ de biogás en un biodigestor de volumen 22.4m³, se necesitaría la adición de 504 litros de melaza que tiene un costo aproximado de \$252 dólares estadounidenses americanos que representa un gasto elevado para su implementación por lo cual no se consideraría rentable.

3.3. Análisis de Resultados

3.3.1. Monitoreo de Temperatura

Tabla 3-3: Monitoreo de Temperatura interna y ambiental

Temperatura (°C)					
Día	Fecha	B. Exp. 1 M. Patrón	B. Exp. 2 6% melaza	B. Exp. 3 3% melaza	T. Ambiente
1	15-01-22	13,6	13,6	13,6	11,2
2	16-01-22	11,3	11,5	11,3	10,9
3	17-01-22	10,8	10,5	10,7	11,2
4	18-01-22	10,3	10,2	9,80	11,4
5	19-01-22	9,9	10,2	10,1	10,9
6	20-01-22	10,0	10,0	9,70	11,1

7	21-01-22	9,9	10,2	10,1	10,9
8	22-01-22	10,1	10,3	9,90	10,9
9	23-01-22	10,1	10,5	9,80	10,7
10	24-01-22	10,1	10,6	9,90	10,9
11	25-01-22	9,8	10,3	10,1	10,9
12	26-01-22	9,8	10,5	9,90	9,80
13	27-01-22	9,8	10,2	10,0	10,1
14	28-01-22	10,1	10,3	10,1	10,7
15	29-01-22	9,8	10,1	10,0	9,80
16	30-01-22	10,1	10,5	10,2	10,9
17	31-01-22	10,0	10,8	10,3	11,2
18	01-02-22	10,0	10,1	10,0	10,9
19	02-02-22	10,0	10,2	9,80	10,9
20	03-02-22	10,1	10,5	10,1	11,1
21	04-02-22	10,0	10,3	10,1	11,0
22	05-02-22	10,1	10,2	10,0	10,7
23	06-02-22	10,1	10,5	10,2	11,3
24	07-02-22	10,1	11,1	10,5	11,5
25	08-02-22	10,1	10,3	10,2	11,1
26	09-02-22	10,0	10,1	10,0	10,9
27	10-02-22	9,9	10,5	10,1	10,7
28	11-02-22	10,1	10,4	9,70	11,1
29	12-02-22	10,0	10,5	10,0	10,9
30	13-02-22	10,0	11,3	9,80	11,0
31	14-02-22	10,0	10,3	10,1	11,1
32	15-02-22	10,1	10,1	10,0	11,3
33	16-02-22	10,1	9,80	10,0	11,1
34	17-02-22	10,1	10,0	9,80	10,9
35	18-02-22	10,0	10,0	9,80	10,9
36	19-02-22	10,0	10,2	10,1	11,0
37	20-02-22	10,1	10,0	10,0	10,7
38	21-02-22	10,1	10,0	10,0	10,9
39	22-02-22	10,1	9,80	10,0	10,6
40	23-02-22	10,1	10,1	9,90	10,9

41	24-02-22	10,0	10,0	10,0	11,2
42	25-02-22	10,0	9,80	9,90	10,8
Promedio		10.16	10.40	10.13	10.90

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

El monitoreo de la temperatura fue ejecutado durante 90 días en los tres biodigestores experimentales y la temperatura ambiente, en la tabla 3-3 se consideraron 42 días que fueron los más representativos, ya que al día N. 39 corresponde al 22 de febrero del 2022 se registró la última generación de biogás en el biodigestor 2 que fue el más productivo durante el mayor tiempo.

El primer día correspondiente al 15 de enero del 2022 la temperatura presenta el valor más alto de los 42 días considerados en los 3 biodigestores, debido a que la preparación del sustrato se realizó directamente en cada biodigestor con estiércol fresco y se agitó por un tiempo aproximado de 10 minutos hasta homogenizar la mezcla, lo cual produjo un cierto grado de calor.

El promedio de la temperatura ambiental (10.9 °C) fue baja, debido a que la Hacienda La Estancia se encuentra a una altura de 3643 msnm, las condiciones climáticas del lugar durante el tiempo de la ejecución del proyecto también fueron desfavorables por la presencia de precipitaciones intensas y abundantes.

El gráfico 1-3 se realizó a partir de los datos de la Tabla 3-3, se puede observar que la oscilación de la temperatura de los puntos más bajos es de 9.8 °C registrados en los días 12 y 15 correspondientes a las fechas 26 y 29 de enero del 2022 y el punto más alto se registró el 7 de febrero del 2022 correspondiente al día 24 durante el proceso de generación de biogás con una temperatura ambiente de 11.5 °C. Los cambios drásticos de la temperatura ambiente y los valores bajos no fueron favorables para la adaptación de los microorganismos bacterianos en la digestión anaerobia por lo que se puede definir que el mejoramiento térmico fue un factor esencial para contribuir a la fase de la adaptación durante el crecimiento bacteriano.

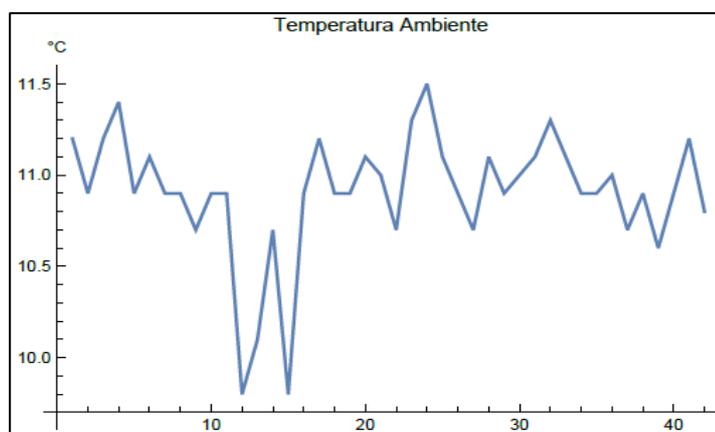


Gráfico 1-3. Temperatura ambiental en lapso de 40 días

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

3.3.2. *Biodigestor experimental 2*

El gráfico 2-3 fue realizado a partir de los valores de la Tabla 3-3, en el cual se observa una mayor estabilidad de la temperatura del biodigestor 2 frente a los cambios de la temperatura ambiental, lo que representa que fue favorable la adaptación del mejoramiento térmico para el crecimiento bacteriano en la producción de biogás.

La oscilación de la temperatura de los puntos más bajos se registró en las fechas 16, 22 y 25 de febrero del 2022 con un valor de 9.8 °C, y el punto más alto se registró el 13 de febrero del 2022 con una temperatura de 11.3 °C que corresponde al día N. 30 el cual se consideró como el tiempo de retención donde se generó la mayor cantidad de biogás con un volumen de 750 ml.

Durante el 14 de febrero del 2022 hasta el 22 de febrero del 2022, disminuye la temperatura manteniéndose en un promedio aproximado de 10 °C que es similar a la temperatura ambiente lo cual evidencia la disminución de la actividad bacteriana y con ello el fin de la producción de biogás.

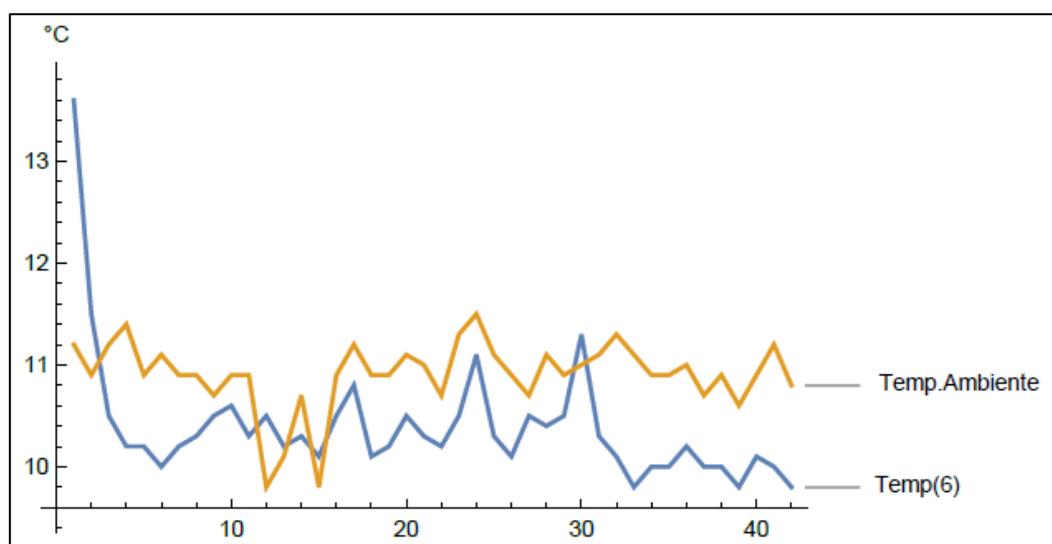


Gráfico 2-3. Temperatura B. exp. 2 vs Temperatura ambiente

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

3.3.3. *Biodigestor experimental 3*

Mediante los valores de la Tabla 3-3 se realizó la gráfica 3-3, donde la oscilación del punto más bajo se registra los días 20 de enero del 2022 y 11 de febrero del 2022 con un valor de 9.7 °C y la oscilación del punto más alto se registra el día 7 de febrero del 2022 con un valor de 10.5 °C correspondiente al día número 24 que fue considerado como el tiempo de retención con la generación máximo de 30 ml de biogás.

Se puede observar también que la temperatura del biodigestor 3 se mantuvo con valores bajos respecto a la temperatura ambiente, pero con un mayor equilibrio, lo cual es efecto del mejoramiento térmico implementado y la interacción bacteriana ejecutada en el interior del biodigestor.

A partir del día 25 correspondiente al 8 de febrero del 2022 se puede apreciar un desequilibrio en los cambios de temperatura en comparación a los días anteriores por lo cual se evidencia que disminuyó la cinética bacteriana y con ello la producción de biogás.

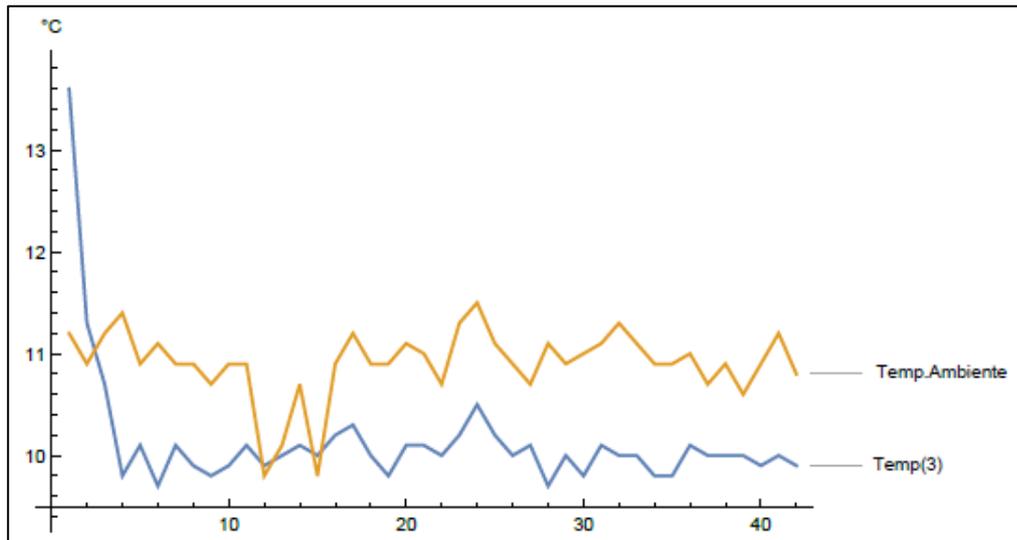


Gráfico 3-3. Temperatura B. exp. 3 vs Temperatura Ambiente

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

3.3.4. Temperatura del Biodigestor 2 y Biodigestor 3

La gráfica 4-3 se realizó con los datos de la tabla 3-3. Se observa que la temperatura del biodigestor 2 se mantuvo con valores superiores de la temperatura del biodigestor 3, los dos biodigestores estuvieron instalados en el mismo lugar bajo condiciones de mejoramiento térmico, pero la diferencia de temperatura se debe a que en el interior del biodigestor 2 hubo mayor interacción microbiana lo cual crea un cierto grado de calor teniendo como resultados mayor producción de biogás durante un tiempo más prolongado.

En la gráfica 4-3, se observa que la oscilación más alta del biodigestor 3 correspondiente al día 24 de la digestión anaerobia en la fecha 7 de febrero del 2022 coincide con la segunda oscilación más alta del biodigestor 2. Posterior a la fecha indicada la temperatura del biodigestor 3 desciende significativamente ante la temperatura del biodigestor 2, lo cual evidencia que en el biodigestor 2 sigue el proceso de digestión anaerobia a medida que en el biodigestor 3 a finalizado.

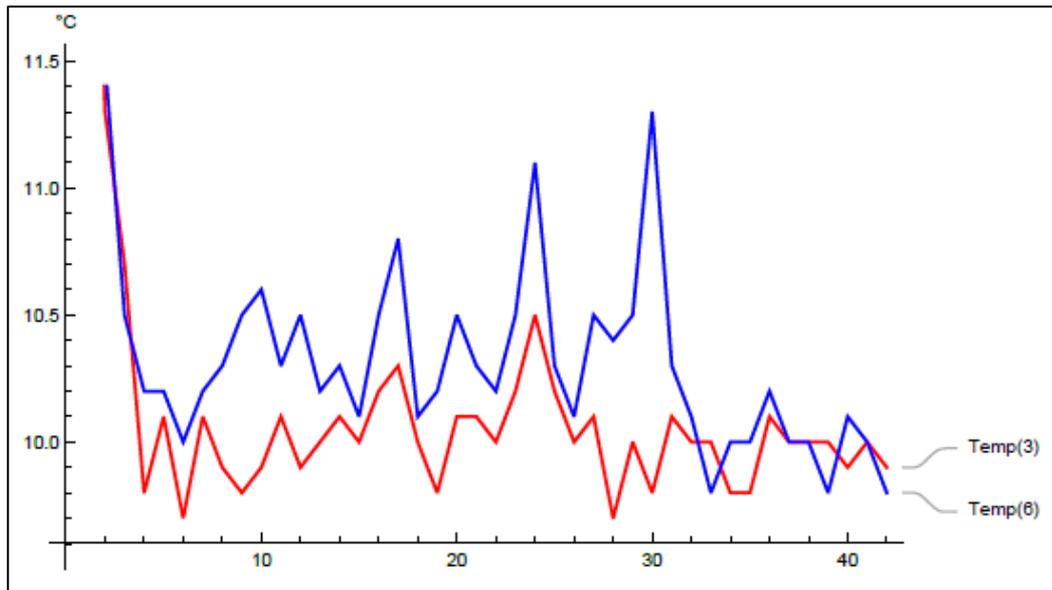


Gráfico 4-3. Temperatura Biodigestor 2 vs Biodigestor 3

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

3.3.5. Influencia del acondicionamiento térmico en la producción de biogás

En esta investigación los 3 biodigestores fueron instalados bajo condiciones de mejoramiento térmico debido a que en el sector de Ilapo la temperatura varía drásticamente y tiene un valor promedio de 10°C, lo cual no es beneficioso para el proceso de digestión anaerobia. Según Lara (2016), existe una diferencia significativa entre el biodigestor 1 sin acondicionamiento térmico y el biodigestor 2 con acondicionamiento térmico, una vez analizados, el biodigestor 2 presentó un menor tiempo de retención y produjo mayor volumen de biogás.

3.3.6. Monitoreo de pH

Tabla 4-3: Valores de pH durante la generación de biogás

Día	FECHA	B. exp. 1 (Muestra Patrón)	B. exp. 2 (6% melaza)	B.exp. 3 (3% melaza)
1	15-01-22	6.5	6.5	6.5
9	23-01-22	6	6	6
16	30-01-22	6,5	6	6
24	07-02-22	8	6.5	6
30	13-02-22	8	6.5	5
38	21-02-22	8	6	5
39	22-02-22	8	6	5

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

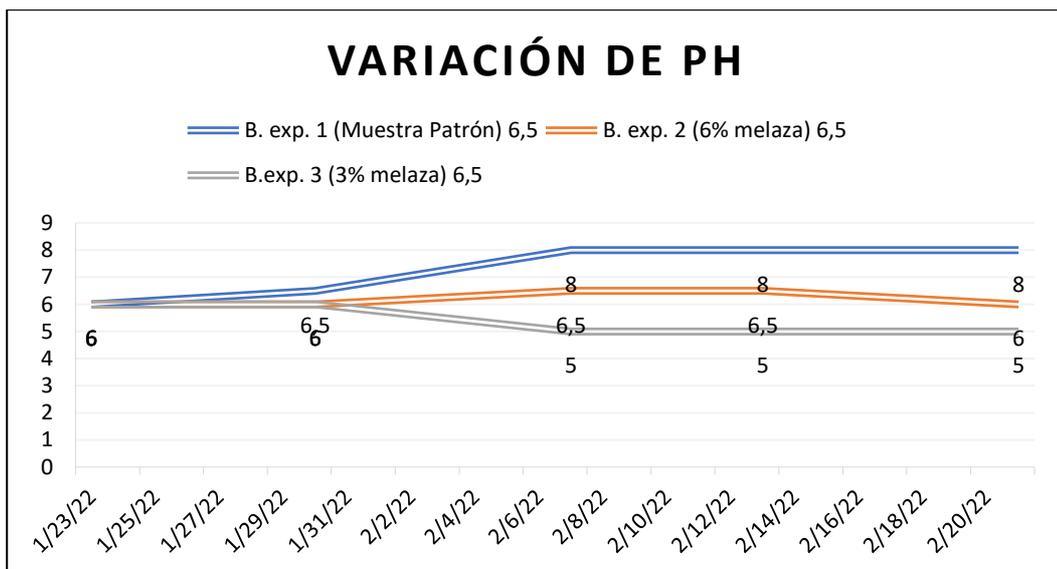


Gráfico 5-3. Valores de pH

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

El gráfico 5-3 se realizó a partir de los datos de la tabla 4-3. En el biodigestor experimental 1 (muestra patrón) se observa que entre el primer día del 15 de enero hasta el día 16 del 30 de enero el valor del pH se encuentra dentro de los rangos admisibles correspondientes a las 3 primeras fases de la digestión anaerobia (hidrolítica, acidogénicas, acetogénicas) y a partir del día 24 incrementa manteniéndose en un valor de 8 que está en límite superior admisible en la digestión anaerobia con riesgo de producir efecto de inhibición, lo cual representó un factor para que no se genere biogás durante el tiempo monitoreado ya que las bacterias metanogénicas se desarrollan en un rango de pH de 6.5 a 7.5 y como óptimo el valor de 7, también se puede observar el efecto inversamente proporcional de la temperatura sobre el pH evidenciando que a bajas temperaturas el valor de pH aumenta.

En el biodigestor 2, a partir del primer día del 15 de enero hasta el día 39 del 22 de febrero el pH se mantuvo entre 6 a 6.5 que está dentro de los valores admisibles en las diferentes fases de la digestión anaerobia por lo cual se generó biogás durante un lapso de 39 días. En este biodigestor no se evidenció el efecto inversamente proporcional de la temperatura frente al pH debido a la cinética bacteriana durante el proceso de digestión anaerobia.

El biodigestor 3, mantuvo un pH de 6 hasta el día 24 correspondiente al 7 de febrero que fue el lapso donde se generó biogás en bajas cantidades debido a que las bacterias metanogénicas se desarrollan con facilidad en un rango de pH de 6.5 a 7.5 y se mantuvo dentro del rango de la etapa hidrolítica y acidogénicas en la digestión anaerobia. A partir del día 30 correspondiente al 13 de febrero el pH descendió y se mantuvo en un valor de 5 durante los siguientes días de monitoreo el cual está próximo al límite inferior admisible para la digestión anaerobia.

3.3.6.1. Influencia del pH en la producción del biogás

Una vez preparada y sellada la muestra, el valor inicial del pH en los tres tuvo un valor 6.5 para el proceso inicial de digestión anaerobia. Según Espinal Juan et al (2016), dice que el pH no es un factor decisivo en la cantidad de biogás que se produce, lo cual coincide con el presente proyecto de investigación. Los valores de pH en el biodigestor 2 y 3 se mantuvo en un rango de 6 a 6.5, teniendo en consideración que el biodigestor 2 se añadió 6% de melaza y generó mayor cantidad de biogás por un mayor lapso.

Además, Chillo F (2018), en su estudio menciona que el valor óptimo para el inicio de la digestión anaerobia según sus resultados fue de 7.3 y los cambios de este valor fue estabilizado por la interacción de las bacterias presentes en el proceso. En la investigación de la Hacienda la Estancia, 1 biodigestor 1 (muestra patrón) dio un rango de pH cercano a 7.3 hasta 8.0 y no produjo ninguna cantidad de biogás.

Se podría decir que el valor del pH no es un factor influyente en la producción de cantidad de biogás.

3.3.7. Volumen de biogás generado

Tabla 5-3: Volumen de biogás Biodigestor 2 y Biodigestor 3

Día	Fecha	B. Exp. 2 6% melaza	Acumulado 2	B. Exp. 3 3% melaza	Acumulado 3
1	15-01-22	0	0	0	
9	23-01-22	400	400	0	
10	24-01-22	520	920	0	
16	30-01-22	0	920	100	100
17	31-01-22	630	1550	110	210
24	07-02-22	690	2240	130	340
30	13-02-22	750	2990		
38	21-02-22	50	3040		
39	22-02-22	10	3050		

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

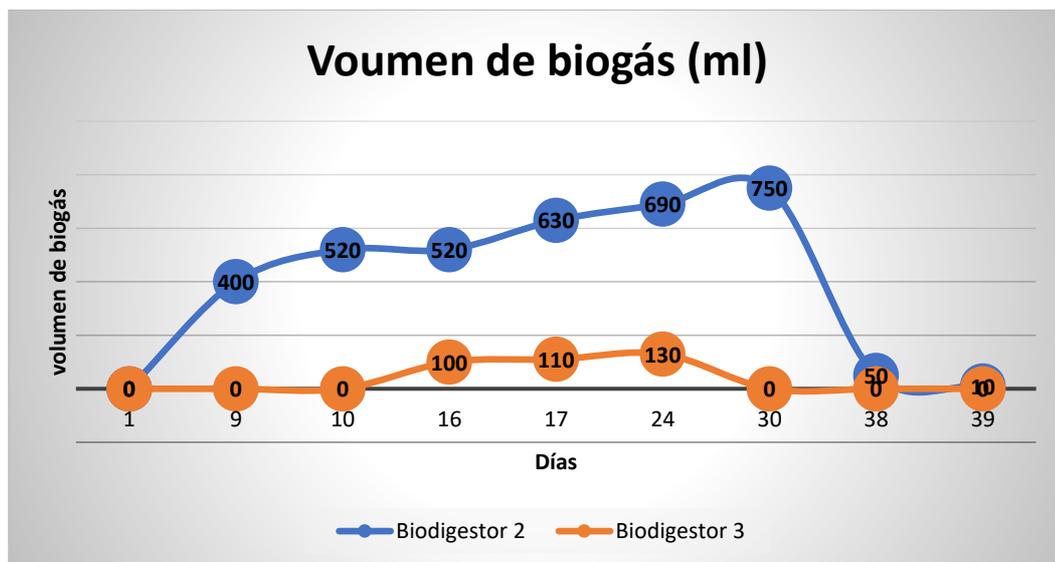


Gráfico 6-3. Volumen de biogás en Biodigestor 2

Realizado por: Heredia, Juan, 2022.

El gráfico 6-3, se realizó a partir de la Tabla 5-3. Los biodigestores estuvieron totalmente cerrados y cubiertos bajo mejoramiento térmico creando un ambiente adecuado para el inicio de la digestión anaerobia y a partir del noveno día correspondiente al 23 enero realizó la primera prueba de la probeta.

En el biodigestor experimental 2, a partir del noveno día se evidenció la primera generación de biogás con la cantidad de 400 ml lo que indica que las bacterias se han adaptado al medio, desde el 10mo día que se generó 520 ml de biogás hasta el día 30 se evidenció un aumento progresivo en la producción de biogás que representó a su vez la fase de crecimiento exponencial de las bacterias y el día 30 como el tiempo de retención donde se generó la cantidad máxima de biogás con un volumen de 750 ml. A partir del día 21 de febrero la generación de biogás disminuyó en gran proporción hasta el 22 de febrero (50 y 10 ml respectivamente) que fue la fecha donde cesó la producción de biogás. el volumen total de biogás generado en el biodigestor 2 fue de 3050 ml y el día 16 marca cero debido a que en esa fecha se realizó la prueba de la flama.

En el biodigestor experimental 3, el día 16 del 30 de enero se evidenció la primera producción de biogás con 100 ml, al siguiente día el 31 de enero se genera la segunda producción de biogás con un valor de 110 ml lo cual indica que las bacterias están adaptadas al medio, pero en comparación del biodigestor 2 no tienen los nutrientes óptimos para una mayor producción ya que en comparación del biodigestor 2 en este biodigestor solo se añadió el 3% de melaza. El día 24 del 7 de febrero se registró la última producción de biogás con un volumen de 130 ml y a partir de esta fecha no se constató más producción de biogás por lo que se identifica a partir del día 25 la fase de muerte en el crecimiento bacteriano. El volumen total de biogás generado en el biodigestor experimental 3 fue de 340 ml.

3.3.7.1. Discusión de la producción de biogás – efecto melaza

Según Zelaya Edwin et al (2017), menciona que la adición del 6% de melaza del total del sustrato proporciona mayor disponibilidad de azúcares solubles y nutrientes a la mezcla, y con esto acelera el inicio de la generación de biogás e incrementa el volumen de producción, esto corrobora los resultados obtenidos en la investigación de la Hacienda la Estancia, donde, el biodigestor 2 con 6% de melaza registró la primera producción de biogás en el noveno día con un volumen total de 3050 ml frente al biodigestor 3 con 3% de melaza que generó biogás al día 16 con un volumen total de 340 ml, y el biodigestor 1 que representa la muestra patrón, sin melaza, no registró producción de biogás. Entonces, se considera que la melaza fue el factor principal en la generación del biogás.

En estudios realizados por Calderón Carlos (2015), efectuado en zona altiplano similar a este estudio de investigación, la mezcla de sustrato fue: estiércol-agua, y expone resultados de la primera producción de biogás en el día 13 con un volumen de 30ml y tiempo de retención de 46 con un volumen de 780 ml, mientras que en la investigación realizada en la Hacienda la Estancia, en la mezcla estiércol-agua (6% de melaza) la primera producción fue en el día 9 con un volumen inicial de 400 ml y un tiempo de retención 30 con el volumen de 750 ml. Los resultados confirman que la adición de melaza al 6% acelera la generación de biogás e incrementa el volumen de producción ya que los dos estudios mencionados se realizaron bajo condiciones similares.

CONCLUSIONES

- Se diseñó el biodigestor en la Hacienda La Estancia bajo condiciones ambientales desfavorables con una temperatura ambiental de 11°C logrando producir biogás en el biodigestor 2 que fue el más productivo, y se determinó un tiempo inicial de 9 días con un volumen de 400 ml.
- A partir de los biodigestores experimentales estudiados, se determinó que la adición de 3 y 6% de melaza al sustrato con proporción 1:2 estiércol-agua aceleró el tiempo de inicio de producción de biogás frente a la muestra patrón y la cantidad de 6% fue la más eficiente frente a las dos muestras con la generación de mayor volumen de biogás con un total de 3050ml.
- Realizado los tres biodigestores experimentales, el biodigestor número dos presentó mejores características y mediante las aplicaciones técnicas cuantitativas y cálculos se determinó los diferentes parámetros de diseño como son: volumen total $39,6\text{m}^3$, longitud 4,02m, diámetro 3,54m, con una carga diaria de 990kg y una producción diaria de $9,9\text{m}^3$, lo cual permitirá cubrir el 100% del consumo de biogás en la Hacienda pero con una inversión costosa para la adición del 6% de melaza y mejoramiento térmico.

RECOMENDACIONES

- Al utilizar agua caliente en la preparación de la mezcla estiércol-agua es beneficioso porque ayuda a homogenizarla y evita la formación de grumos.
- Se debe utilizar estiércol fresco en la preparación del sustrato para tener mayor cantidad de materia orgánica.
- Es mejor instalar el sistema de biodigestores en una superficie plana para evitar la acumulación del agua y tener fácil acceso.
- La recolecta del estiércol se debe efectuar dentro de un área libre de posibles elementos inhibidores en la producción de biogás.
- Sería apropiado incentivar la investigación para el uso de energías limpias en el sector rural a partir de los desechos orgánicos provenientes de las diferentes actividades de producción agrícola y ganadera.

BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, Yanaris Lorenzo & OBAYA ABREU, María Cristina. “La digestión Anaerobia”. *Redalyc* [en línea], 2005, 1(2), pp. 35–48. [Consulta: 05 mayo 2022]. ISSN 0138-6204. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>

ACUÑA RUBIO, José Patricio. Diseño e implementación de un biodigestor para el tratamiento de excretas de ganado bovino cadet-tumbaco 2015 [en línea] (Trabajo de Titulación). (Titulación) Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. 2009. pp. 25-35. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/6441/3/T-UCE-0004-18.pdf>

ARBOLEDA, Yanira & GONZÁLES, Luis. *Biodigestores* [en línea]. 2ª ed. Argentina: Colección-Doc, 2009. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=CV2mDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=BIODIGESTORES&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=BIODIGESTORES&f=true

ARRELLANO, Luis.; Et Al. *Purificación y usos del biogás* [en línea]. España: Servedit, 2014. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=O1IoDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA4&dq=composición+del+biogás+libro&ots=56CKoftFOh&sig=KS8epgwQkdjhGWEfp0QkxhvZiuc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

BARRENA, Manuela. & MAIEELO, P. *Biogás: producción y aplicaciones* [en línea]. 3ª ed. Ecuador: ServiPublic, 2018. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Biogás:-producción-y-aplicaciones-Gurbillón-Quintana/a743978bd45c64dd054dd3d62fb2ee0f0fd7a303>

CAMPESINOS, Henry. *Granja integral autosuficiente* [en línea]. Colombia-Bogotá: Granja, 2014. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=5pjGDwAAQBAJ&pg=PA193&dq=que+e+s+un++biodigestor&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjt3qqFsYf2AhU3QzABHeH6DN0Q6AF6BAgHEAI#v=onepage&q=que%20es%20un%20biodigestor&f=true>

CAMPOS CASTELLS, Elena.; Et al. *Proceso Biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje* [en línea]. 4ª ed. Ecuador-Quito: Díaz de Santos, 2012. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible

en: https://books.google.com.ec/books?id=sAOTHkOK9CUC&printsec=frontcover&dq=digestion+anaerobia+biogas&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=digestion%20anaerobia%20biogas&p:f=true

CAMPOS POZUELO, Antonia Elena. Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria [en línea] (Trabajo de Doctorado). (Doctorado) Universidad de Lleida, Cataluña, España. 2001. pp. 256-268. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf?sequence=1>

CHILLO ABRIL, Jonathan Fabricio. & PAGUAY CUVI, Saúl Basilio. Implementación de un biodigestor continuo para producción de biogás a partir de estiércol de ganado vacuno en la finca la poderosa. [en línea] (Trabajo de Titulación). (Titulación) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2015. pp. 26-30. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4773>

COA. 2004. *Ley de Gestión Ambiental*. Anexo 3.

CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. 2008.

DELGADO, Manual. “Evaluación técnica y ambiental de la influencia de la temperatura en la producción de biohidrógeno en procesos de fermentación oscura de biomasa residual a gran escala”. *Dustedit* [en línea], 2018, 3(5), pp. 16–18. [Consulta: 05 mayo 2022]. ISSN 1587-4857. Disponible

en: <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=3b571b837cf5f4fdJmltdHM9MTY1ODQ0NTIyMyZpZ3VpZD05NjRjNDVjMy02ZWlwlTQ4NTMtYmM1Yy05OTcyOTAyZTFkNjAmaW5zaWQ9NTEzNQ&p:ntb=1>

DOROTEO, José. “Medición de los biorreactores”. *Science* [en línea], 2020, 2(9), p. 51. [Consulta: 05 mayo 2022]. ISSN 1587-5985. Disponible en: https://id.elsevier.com/as/authorization.oauth2?state=6a107ef3143575e9302c1ffd01cceb34&prompt=login&scope=openid%20email%20profile%20els_auth_info%20els_analytics_info%20urn:com:elsevier:idp:policy:product:indv_identity&authType=SINGLE_SIGN_IN&response_type=code&platSite=MDY/mendeley&redirect_uri=https://www.mendeley.com/callback/&client_id=MENDELEY

DURAZNO CORONEL, Alexander David. Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas [en línea] (Trabajo de Titulación). (Titulación) Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2018. pp. 29-39. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15445/1/UPS-CT007585.pdf>

FAO. *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores: proyecto para la ... - organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura* [en línea]. 2ª ed. Argentina-Buenos Aires: Colección Técnicas, 2019. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=CV2mDwAAQBAJ&pg=PA10&dq=tiempo+de+retencion+biogas&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiU96br1fr2AhUBRjABHRIJCbUQ6AF6BAgFEAI#v=onepage&q=tiempo%20de%20retencion%20biogas&f=true>

FAO. *Manual de biogás* [en línea]. 2ª ed. Ecuador-Guayaquil: Doprep, 2011. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.

FORERO CARRASCO, María Angélica & SÁNCHEZ QUEVEDO, Andrea Catalina. Desarrollo de la ingeniería conceptual del proceso de producción de biogás mediante los residuos orgánicos provenientes de la Plaza Distrital de Mercado Siete de Agosto [en línea] (Trabajo de Titulación). (Titulación) Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2017. pp. 29-35. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6370>

GARCÍA RODRIGUEZ, Angie Mariana. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia [en línea] (Trabajo de Titulación). (Titulación) Universidad de la Américas, Bogotá, Colombia. 2016. pp. 16-24. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/667/1/6112733-2016-2-IQ.pdf>

GARCÍA, V. *Conceptos básicos. beneficios de su producción y la aplicación de sus subproductos.* [en línea]. Argentina-Buenos Aires: ArgBook, 2015. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible

en: https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf

MARAÑÓN MAISON, Elena.; Et al. *Generación de residuos de ganadería vacuna (purines) es Asturias* [en línea]. España-Barcelona: servicio de Publicaciones, 1998. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible

en: <https://books.google.com.ec/books?id=EbmKpBj14e0C&pg=PA80&dq=BIOGAS+composicion&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi93ZTpiYr2AhU2RjABHYfcAhEQ6AF6BAgDEAI#v=onepage&q=BIOGAS%20composicion&f=true>

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. *El sector del biogás agroindustrial en España* [en línea]. España: Sección Edit, 2010. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf

MORENO VEGA, Alberto. *Instalaciones, maquinaria y equipos agrícolas* [en línea]. España: Paraninfo, 2016. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=6S2lDAAAQBAJ&pg=PA82&dq=componentes+de+un+biodigestor&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwip_5vuooj2AhUuRzABHftmCFoQ6AF6BAgLEAI#v=onepage&q=componentes%20de%20un%20biodigestor&f=false

MORENO, J.; Et al. *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica ii.2* [en línea]. España: Paraninfo, 2017. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: <https://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484767008/aspectos-biologicos-de-la-digestion-anaerobica-ii-2>

MUDHOO, A. *biogás production: pretreatment methods in anaerobic digestion* [en línea]. Estados Unidos: Published, 2012. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=ISgticjRiLgC&oi=fnd&mp:pg=PR15&dq=MUDHOO,+A.,+2012.+Biogas+Production:+Pretreatment+Methods+in+Anaerobic+Digestion&ots=oMUYHNpF9n&sig=yphuDrVAknVsdnhlZOmUyTr0qgM#v=onepage&q=MUDHOO,%20A.,%202012.%20Biogas%20Production:%20Pretreatment%20Methods%20in%20Anaerobic%20Digestion&f=false>

PÉREZ SUIN, Leyton Marcelo. Producción y evaluación de biogás en un biodigestor usando estiércol de vaca en el cantón milagro [en línea] (Trabajo de Titulación). (Titulación) Universidad Agraria del Ecuador, Quevedo, Ecuador. 2011. pp. 26-28. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible en: <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/PEREZ%20SUIN%20LEYTON%20MARCELO.pdf>

PLUGGE, Cristhian. “biogás. Microbiol biotechnology”. *Sfam* [en línea], 2017, 10(5), pp. 1128–1130. [Consulta: 05 mayo 2022]. ISSN 1751-7915. Disponible en: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1751-7915.12854>

REDBIOLAC. Biodigestores [web]. Colombia: 2020. [Consulta: 5 mayo 2022]. Disponible en: <http://redbiolac.org/los-biodigestores/>

RIVAS SOLANO, Olga; Et al. “Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad”. *Tec* [en línea], 2009, 23(1), p. 42. [Consulta: 05 mayo 2022]. ISSN 1524-7854. Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/132/131

SAFONT, Diego. *Estudio de viabilidad para la producción de biogás en un vertedero de residuos sólidos urbanos* [en línea]. Castellón: Grau, 2017. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: <https://1library.co/document/qo5wx2jy-estudio-viabilidad-produccion-biogas-vertedero-residuos-solidos-urbanos.html>

SALAZAR SOSA, E.; Et al. *Uso sustentable del suelo y abonos orgánicos* [en línea]. España: Coedit, 2003. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/297274551_USO_SUSTENTABLE_DEL_SUELO_Y_ABONOS_ORGANICOS

SIERRA GOLDBERG, Hugo Percy.; Et al. *Purificación y usos del biogás. /purification and use of biogás* [en línea]. España-Barcelona: Editsciencie, 2017. [Consulta: 05 mayo 2022]. Disponible

en: https://www.researchgate.net/publication/316656176_Purificacion_y_usos_del_biogasPurification_and_use_of_biogas

TOSCANO SANGUIL, Tatiana Carolina. Diseño de un biodigestor anaeróbico para la obtención de biogás, a partir de las excretas de ganado vacuno en el rancho Guadalupe, en el cantón mocha provincia de Tungurahua en el año 2015 [en línea] (Trabajo de Titulación). (Titulación) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. pp. 26-29. [Consulta: 2022-05-05]. Disponible

en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4898/1/236T0186.pdf>

ANEXOS

ANEXO A: INSTALACIONES HACIENDA “LA ESTANCIA”

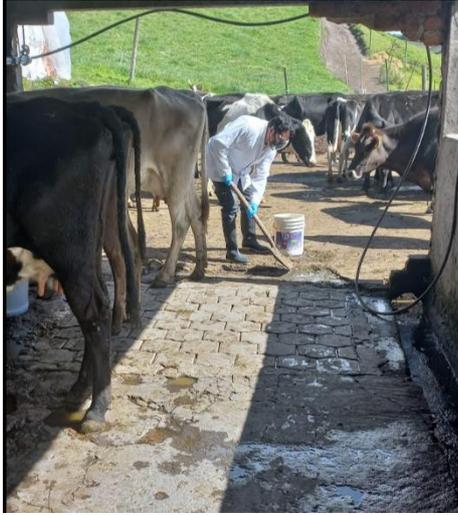


Vista general de las Instalaciones de la Hacienda “La Estancia”



Corral para el ordeño del ganado bovino

ANEXO B: PESAJE Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE ESTIÉRCOL



Pesaje de las excretas del ganado bovino de la muestra representativa seleccionada



Recolección de las muestras de excretas del ganado bovino para el análisis de laboratorio

ANEXO C: CONSTRUCCIÓN DE LOS BIODIGESTORES EXPERIMENTALES



Preparación de materiales y mediciones previas al ensamblaje de los Biodigestores Experimentales



Ensamblaje y sellado de los Biodigestores Experimentales

ANEXO D: PREPARACIÓN DEL ÁREA E INSTALACIÓN DE LOS BIODIGESTORES



Zanja para la Instalación de los Biodigestores





Mejoramiento térmico previo a la instalación

ANEXO E: INSTALACIÓN DE LOS BIODIGESTORES EXPERIMENTALES



Instalación y etiquetado de los Biodigestores experimentales

ANEXO F: CARGA DE LOS BIODIGESTORES EXPERIMENTALES



Preparación y carga del sustrato



Adición de melaza 3% y 6%



Mezcla del sustrato

ANEXO G: MONITOREO DE PARÁMETROS DE CONTROL



Medición de pH



Medición de Temperatura Interna

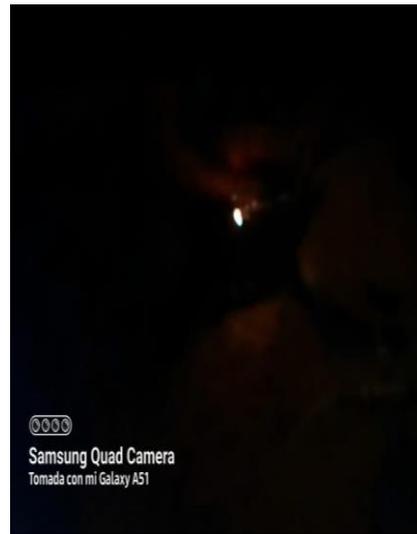


Medición de Temperatura Externa y
Humedad

ANEXO H: PRUEBA DE FLAMA Y PROBETA



Prueba de Probeta



Prueba de Flama

