



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

TESIS DE GRADO

Aprovechamiento energético de excretas caprinas mediante
biodigestión anaeróbica para la cocción de alimentos en el café las
cabritas, Estelí.

Zamora, M; Velásquez, A; Duarte, Y.

Tutor

MSc. José Antonio Castillo Hernández

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DE ESTELÍ

¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

Centro Universitario Regional de Estelí CUR-ESTELÍ

Recinto Universitario “Leonel Rugama Rugama”

Departamento Ciencias Tecnológicas y salud

Aprovechamiento energético de excretas caprinas mediante biodigestión
anaerobia para la cocción de alimentos en el café Las Cabritas, Estelí

**Trabajo de investigación para optar al grado de
Ingeniero en energías renovable**

Autores

Martin Natanael Zamora Martínez

Ana Jansy Olivas Velásquez

Yader Israel Duarte

Tutor

MSc. José Antonio Castillo Hernández

Estelí, 05 de diciembre del 2025



Dedicatoria

El presente es de ustedes; el futuro, por el cual realmente he trabajado, es mío.

Nikola Tesla

Dedicamos este trabajo a Dios, quien ha sido nuestra guía constante en cada etapa de este camino académico. En Él encontramos la fuerza para superar el cansancio, la claridad en las decisiones y la fe que sostuvo nuestro esfuerzo hasta el final. Con humildad entregamos este logro como muestra de gratitud.

A nuestros padres, cuyo amor incondicional y sacrificios silenciosos cimentaron nuestra formación. Su ejemplo de disciplina y honestidad nos enseñó a valorar cada esfuerzo, y su compañía y confianza hicieron posible culminar este proceso con firmeza y esperanza compartida.

A nuestros docentes, que con entrega y compromiso sembraron en nosotros el interés por aprender y cuestionar. Su orientación fortaleció nuestra capacidad de investigar con rigor y responsabilidad, y su ejemplo inspiró la integridad que hoy se refleja en este trabajo conjunto.

A mis amigos más cercanos el Sr. Gutiérrez y a la Sr. Fajardo, por haber sido compañía constante en este recorrido universitario. Su apoyo, alegría y lealtad hicieron más ligero cada desafío y más memorables los logros alcanzados. Con gratitud sincera, este trabajo lleva también el reflejo de nuestra amistad.

“A la memoria de Dr. Lizandro D` León Mairena QEPD”

Agradecimiento

A Dios, por concedernos salud, fortaleza y la dicha de mantenernos unidos en cada etapa de este proceso. Su misericordia nos ha sostenido en los momentos de incertidumbre, y su presencia ha sido guía constante en medio de los desafíos. Reconocemos que, sin Él, este logro no habría sido posible, y lo dedicamos con gratitud profunda.

A nuestros padres, por enseñarnos a luchar sin rendirse, incluso cuando las circunstancias han sido adversas. Su ejemplo de entrega, paciencia y amor nos ha inspirado a continuar con firmeza y convicción. Este trabajo es también reflejo de su esfuerzo silencioso, y esperamos que la vida nos alcance para honrar todo lo que han hecho por nosotros.

- Yo Natanael, agradezco profundamente a mi madre Ángeles Martínez, a mi padre Joel Zamora y a mi círculo interno familiar, quienes han sido parte esencial de este proceso. Su apoyo constante, sus palabras de aliento y la confianza que depositaron en mí me dieron la fortaleza necesaria para continuar.
- Yo Ana Jansy, agradezco a mi madre Pastora Velásquez, a mi padre Gamaliel Olivas y de manera especial a la familia Reyes quienes me brindaron su apoyo desde siempre.
- Yo Yader, agradezco a mi hermana Xochilth Karolina Duarte

A nuestro tutor, MSc. José Antonio Castillo, por su acompañamiento constante en la elaboración de esta tesis. Su compromiso y orientación fueron fundamentales para dar continuidad y sentido al trabajo, brindándonos apoyo en cada etapa del proceso.

Al Dr. Juan Alberto Betanco, por haber sido una guía esencial tanto en nuestra formación universitaria como en la culminación de esta tesis. A lo largo de la carrera nos transmitió conocimientos y confianza, y en este trabajo final su apoyo trascendió lo académico, convirtiéndose en una presencia cercana, generosa e inspiradora.

Al Dr. Edwin Reyes, por su valiosa labor como docente y guía en nuestra carrera. Su acompañamiento constante, su disposición para orientar y su compromiso con nuestra formación fueron fundamentales para fortalecer nuestras capacidades y avanzar con seguridad en este proceso académico.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL, ESTELÍ
“2025: Eficiencia y Calidad para seguir en victorias”
Departamento de Ciencias de la Educación y Humanidades

CARTA AVAL DEL TUTOR

Estelí, 01 de diciembre de 2025

Por medio de la presente, en calidad de tutor(a) del trabajo de modalidad de graduación titulado: “**Aprovechamiento energético de excretas caprinas mediante biodigestión anaerobia para la cocción de alimentos en el café Las Cabritas, Estelí**”, elaborado por los estudiantes:

Nombres y Apellidos	Número de Carné
Martin Natanael Zamora Martínez	21514910
Ana Jansy Olivas Velásquez	21513293
Yader Israel Duarte Mendoza	21510763

Estudiantes de la carrera de **ingeniería en energías renovables**, hago constar que he brindado acompañamiento académico y metodológico durante el desarrollo de dicho trabajo, cumpliendo con lo establecido en el cronograma y en la normativa institucional vigente. Asimismo, avalo que el trabajo cumple con los requisitos formales, científicos y éticos exigidos por la Universidad, en cumplimiento de la modalidad de graduación correspondiente.

Atentamente,

MSc. José Antonio Castillo Hernández

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-7135-3021>

UNAN-Managua/CUR-Estelí

CC/

¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!

Barrio 14 de abril, contiguo a la subestación de ENATREL, Tel 27137734, Ext 7424
dceh.curesteli@unan.edu.ni

Resumen

La investigación se realizó en el Café Las Cabritas, Estelí, con el objetivo general de diseñar un sistema de biodigestión anaerobia para el aprovechamiento de excretas caprinas y la cobertura de la demanda energética en el establecimiento durante el año 2025. Se aplicó una metodología de enfoque cuantitativo, utilizando encuestas, observación directa y cálculos experimentales para caracterizar el consumo de gas destinado a la cocción de alimentos, evaluar la disponibilidad de sustrato orgánico en términos de volumen, frecuencia de generación y composición, y dimensionar técnicamente el sistema propuesto. Los resultados demostraron que el consumo mensual de diez cilindros de gas butano de 25 libras puede ser sustituido por la producción de biogás generado a partir de las excretas caprinas disponibles en el sitio. Las pruebas experimentales realizadas en biodigestores tipo batch, bajo condiciones mesofílicas (27–31 °C) y valores de pH estables (6.7–7.0), confirmaron una producción constante de biogás y biofertilizante de calidad. El diseño técnico permitió establecer el volumen útil, la capacidad de carga y los componentes críticos del sistema. El análisis económico-financiero evidenció que la inversión puede recuperarse en un plazo razonable, mientras que la evaluación ambiental mostró beneficios como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la gestión responsable de residuos. Se concluye que la propuesta es viable, sostenible y replicable en otros emprendimientos rurales.

Palabras clave: biodigestión anaerobia; biogás; excretas caprinas; energía renovable; sostenibilidad rural; diseño de biodigestor.

Abstract

The research was conducted at Café Las Cabritas, Estelí, with the general objective of designing an anaerobic biodigestion system for the use of goat excrement and the coverage of the energy demand in the establishment during the year 2025. A quantitative approach methodology was applied, using surveys, direct observation, and experimental calculations to characterize the gas consumption for cooking, evaluate the availability of organic substrate in terms of volume, generation frequency, and composition, and technically size the proposed system. The results showed that the monthly consumption of ten 25-pound butane gas cylinders can be replaced by the production of biogas generated from the goat excrement available on site. Experimental tests carried out in batch-type biodigesters, under mesophilic conditions (27–31 °C) and stable pH values (6.7–7.0), confirmed a constant production of biogas and high-quality biofertilizer. The technical design allowed the establishment of the useful volume, loading capacity, and critical components of the system. The economic-financial analysis revealed that the investment can be recovered within a reasonable period, while the environmental evaluation showed benefits such as the reduction of greenhouse gas emissions and the responsible management of waste. It is concluded that the proposal is viable, sustainable, and replicable in other rural enterprises.

Keywords: anaerobic biodigestion; biogas; goat excrement; renewable energy; rural sustainability; biodigester design.

Índice

1.	<i>Introducción</i>	1
2.	<i>Antecedentes</i>	2
2.1.	<i>Internacionales</i>	2
2.2.	<i>Nacionales - Locales</i>	3
3.	<i>Planteamiento del problema</i>	4
3.1.	<i>Caracterización del problema</i>	4
3.2.	<i>Delimitación del problema</i>	4
3.3.	<i>Formulación del problema</i>	5
3.4.	<i>Sistematización del problema</i>	5
4.	<i>Justificación</i>	6
5.	<i>Objetivos de investigación</i>	8
5.1.	<i>Objetivo General</i>	8
5.2.	<i>Objetivos específicos</i>	8
6.	<i>Limitaciones del estudio</i>	9
7.	<i>Hipótesis</i>	10
8.	<i>Operacionalización de Variables</i>	11
9.	<i>Marco Teórico</i>	15
9.1.	<i>Digestión Anaeróbica</i>	15
9.2.	<i>Fundamentos de la fermentación metanogénica</i>	16
9.3.	<i>Etapas de la fermentación metanogénica</i>	16
9.4.	<i>Tipo de materia prima</i>	20
9.5.	<i>Valor de acides (PH)</i>	21
9.6.	<i>Composición de la materia orgánica</i>	23
9.7.	<i>Humedad</i>	23
9.8.	<i>Sólidos totales</i>	23
9.9.	<i>Sólidos volátiles (SV)</i>	23
9.10.	<i>Sólidos fijos (SF)</i>	23
9.11.	<i>Principales utilidades del Biogás</i>	24

9.12.	<i>Biogás</i>	24
9.12.1.	Biodigestor o digestor	24
9.13.	<i>Propiedades energéticas del biogás.</i>	25
9.14.	<i>Tipos de biodigestores</i>	26
9.15.	<i>Aspectos físico Químicos</i>	27
9.15.1.	Temperatura en el biodigestor	27
9.16.	<i>Relación carbono/nitrógeno de las materias primas.</i>	29
10.	<i>Diseño Metodológico</i>	30
10.1.	<i>Tipo de investigación</i>	30
10.2.	<i>Población y selección de la muestra</i>	32
10.2.1.	Características del área de estudio	33
10.3.	<i>Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos</i>	34
10.3.1.	Técnicas aplicadas.....	34
10.3.2.	Instrumentos utilizados y su diseño	34
Tabla 2.	35
10.3.3.	Procedimiento de aplicación	35
10.4.	<i>Confiability y validez de los instrumentos</i>	36
10.5.	<i>Técnicas, instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos.</i> 37	
11.	<i>Análisis y discusión de resultados</i>	39
11.1.	<i>Caracterización la demanda energética de gas destinada a la cocción de alimentos</i>	39
11.1.1.	Evaluación del consumo actual y proyectado en el área de estudio.	39
11.1.2.	Determinación del volumen del gas en condiciones estándar:.....	39
11.1.3.	Proyección del crecimiento población	41
11.1.4.	Estimación del consumo de gas mensual a futuro.....	41
11.1.5.	Análisis del tamaño de la población, hábitos de consumo de gas y variaciones temporales en el uso de gas para la cocción de alimentos.....	42
11.1.6.	La relación entre flujo de visitantes, consumo de gas y costos operativos.	46
11.2.	<i>Caracterización de la disponibilidad de excretas caprinas como sustrato</i>	

<i>orgánico para la producción de biogás</i>	47
11.2.1. Fuentes de residuos orgánicos en el sitio de estudio.....	47
11.2.2. Volumen, frecuencia de generación y la composición de residuos.....	48
11.2.3. <i>Volumen de Residuos</i>	48
11.2.4. Frecuencia de Generación.....	48
11.2.5. Determinación de la fracción orgánica biodegradable mediante sólidos volátiles (SV).....	50
11.2.6. Composición de Residuos.....	51
11.2.7. Evaluación experimental de la capacidad de generación de biogás	52
11.3. <i>Dimensionamiento el sistema de biodigestión anaerobio para satisfacción de la demanda energética de gas.</i>	56
11.3.1. Sistema Propuesto	56
11.3.2. Cálculo la cantidad de sustrato a utilizar	56
11.3.3. Volumen de sustrato	56
11.3.4. Cálculo del volumen total del biodigestor.....	57
11.3.5. Cálculo del tamaño del biodigestor.....	58
11.3.6. Cálculo de la capacidad de carga del biodigestor.....	59
11.3.7. Dimensiones del biodigestor	59
11.3.8. Producción de biogás esperada	60
11.3.9. Reactor Seleccionado	62
11.3.10. Diseño el sistema de mezcla o agitación del biodigestor	62
11.3.11. Sistema de recolección de biogás	64
11.3.12. Cálculo de la Capacidad del Tanque de Acumulación	65
11.3.13. Cálculo la relación C/N de la mezcla	65
11.3.14. Innovación en el sistema de biodigestión	67
11.3.14.1. Sistema de análisis de temperatura y humedad con Arduino	67
11.3.14.2. Sistema de análisis de PH mediante el uso de Arduino.....	69
11.3.15. Regulador de presión	71
11.3.16. Diagrama de interconexión de tuberías	72
11.3.17. Esquema de interconexión de todo el sistema	73

11.4.	<i>Determinación la viabilidad económica y ambiental de la propuesta energética.</i>	74
11.4.1.	Diseño el sistema de Tratamiento de Lodos.....	75
11.4.2.	Producción de CO2 en relación al consumo actual y producción teórica ...	76
11.4.3.	Viabilidad del proyecto	78
11.4.4.	Evaluación financiera del sistema de biodigestión	84
12.	<i>Conclusiones</i>	87
13.	Recomendaciones	89
14.	Referencias Bibliográficas	91
15.	Anexos.....	96
	Fases del proyecto.....	97
	Cronograma de actividades.....	99
	Herramientas e instrumentos para la recolección de información	101

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Relación de temperaturas y tiempos de retención hidráulica</i>	28
<i>Tabla 2. Instrumentos utilizados</i>	35
<i>Tabla 3. Consumo de gas y personas que visitan el café diaria y mensualmente.</i>	
.....	42
<i>Tabla 4. consumo de gas, costos y visitas de personas al café las cabritas en los primeros 5 meses del año.</i>	43
<i>Tabla 5. Consumo de gas, costos y visitas de personas al café las cabritas en los últimos 7 meses del año.</i>	43
<i>Tabla 6. Promedio diario de generación total de excretas caprinas por mes (lb/día)</i>	49
<i>Tabla 7. Pico de producción de excremento</i>	49
<i>Tabla 8. Promedio de los meses de Junio/noviembre</i>	49
<i>Tabla 9. Generación total de excretas caprinas por mes</i>	49
<i>Tabla 10. Datos de laboratorio basados en pruebas de humedad</i>	51
<i>Tabla 11. Recopilación de datos de la temperatura</i>	53
<i>Tabla 12. Recopilación de datos del PH</i>	54
<i>Tabla 13. Datos de tiempo de retención hidráulica y temperatura según el tipo de región.</i>	57
<i>Tabla 14. Producción específica de biogás a partir de distintos sustratos</i>	61
<i>Tabla 15. Análisis de emisiones de CO₂ con los primeros cuatro meses del año</i>	
.....	76
<i>Tabla 16. Análisis de emisiones de CO₂ con los últimos ocho meses del año.</i>	76
<i>Tabla 17. Evaluación comparativa de escenarios de sustitución y comercialización de biogás</i>	80
<i>Tabla 18. Comparativo mensual entre consumo de gas convencional, generación de biogás y beneficios económicos en el Café Las Cabritas</i>	81
<i>Tabla 19. Costos mensuales de gas y ganancias netas por consumo en el año</i>	
.....	82

<i>Tabla 20. Flujo de ingresos mensuales proyectados para evaluación financiera del sistema de biodigestión.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 21. Evaluación financiera.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 22. Presupuesto para sistema de biodigestor.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 23. Registro de producción de excremento caprino</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 24. Acumulación mensual estimada de excremento caprino.</i>	<i>109</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesófilicos y termófilicos</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3. Ubicación geográfica del café las cabritas</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4. Relación consumo y población en los doce meses en el café las cabritas</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5. Volumen en metros cúbicos de gas al año</i>	<i>45</i>
<i>figura 6. Evaluación de costos de biogás en el año.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 7. Gráfico unificado basado en la población, consumo y costos.....</i>	<i>46</i>
<i>figura 8. Materia de pruebas.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 9. Muestra del sustrato.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 10. Unidad experimental.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 11. Temperaturas registradas</i>	<i>53</i>
<i>Figura 12. PH registrado</i>	<i>54</i>
<i>Figura 13. Prueba de llamas de las tres mezclas evaluadas.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 14. dimensiones del biodigestor</i>	<i>58</i>
<i>Figura 15. Biodigestor seleccionado acorde al dimensionado</i>	<i>62</i>
<i>Figura 16. Agitador para el biodigestor</i>	<i>63</i>
<i>Figura 17. Código para el sensor de humedad y temperatura.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 18. Código para el sensor de pH</i>	<i>69</i>
<i>Figura 19. Continuación del código.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 20. Continuación del código.....</i>	<i>70</i>

<i>Figura 21. Regulador de presión en el biodigestor.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 22. Regulador de presión seleccionado.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 23. Interconexión de tuberías</i>	<i>72</i>
<i>Figura 24. Sistema de interconexión</i>	<i>73</i>
<i>Figura 25. Tratamiento del biol</i>	<i>75</i>
<i>Figura 26. Producción de CO₂ por Gas</i>	<i>77</i>
<i>figura 27. Producción de CO₂ por biogás</i>	<i>77</i>
<i>Figura 28. Relación costo actual a beneficio.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 29. Responsables de la ejecución del proyecto</i>	<i>97</i>
<i>figura 30. Segunda fase de ejecución.....</i>	<i>97</i>
<i>figura 31. Tercera fase de ejecución.....</i>	<i>98</i>
<i>figura 32. Cronograma de actividades.....</i>	<i>99</i>

1. Introducción

El acceso a fuentes de energía sostenibles constituye uno de los principales desafíos en comunidades rurales, donde la dependencia de combustibles fósiles y de la leña genera impactos económicos, sociales y ambientales significativos. En Nicaragua, gran parte de la población rural utiliza gas licuado de petróleo y leña para la cocción de alimentos, lo que incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye a la deforestación. En este contexto, la biodigestión anaerobia se presenta como una alternativa tecnológica capaz de transformar residuos orgánicos en biogás y biofertilizantes, promoviendo la eficiencia energética y la gestión responsable de los desechos.

El Café Las Cabritas, ubicado en Estelí, desarrolla actividades gastronómicas y agropecuarias que generan estiércol caprino como subproducto principal. Actualmente, este residuo es desechado sin tratamiento, ocasionando contaminación ambiental y desaprovechando su potencial energético. Al mismo tiempo, el establecimiento depende del consumo mensual de gas butano, lo que representa un gasto elevado y una vulnerabilidad frente al aumento de precios y dificultades de transporte. Estas condiciones evidencian la necesidad de implementar soluciones técnicas que permitan aprovechar los residuos disponibles y reducir la dependencia de energías convencionales.

En este marco, la presente tesis tiene como propósito diseñar un sistema de biodigestión anaerobia para el aprovechamiento de excretas caprinas y la cobertura de la demanda energética del Café Las Cabritas durante el año 2025. El estudio se orienta a caracterizar la demanda energética del establecimiento, evaluar la disponibilidad de sustrato orgánico, dimensionar el biodigestor requerido y analizar la viabilidad económica, ambiental y social de la propuesta.

Finalmente, el documento se estructura en capítulos que abordan los antecedentes internacionales y nacionales, el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de investigación, seguidos del diseño metodológico, el análisis y discusión de resultados, y las conclusiones y recomendaciones. De esta manera, se ofrece una propuesta técnica integral que busca contribuir al desarrollo sostenible y a la innovación energética en el ámbito rural.

2. Antecedentes

2.1. Internacionales

De Quadros y otros (2010), en su estudio sobre digestión anaeróbica de desechos de cabras y ovejas en un reactor continuo de PVC flexible, abordan dos problemas clave para agricultores de Brasil. El reactor de 33 m³ fue instalado en la Estación Experimental de Jaguarari, donde se monitorearon parámetros bioquímicos, microbiológicos y parasitarios del influente y efluente. Evaluaron la producción y composición del biogás, y el uso del biofertilizante en pasto elefante. Con una gestión adecuada, se redujo el poder contaminante de los residuos; la remoción de coliformes totales y fecales superó el 98%, y se eliminaron larvas de parásitos. La producción de biogás fue de 0,061 m³/kg de estiércol, con 58% de metano y 54% de dióxido de carbono. El biofertilizante resultó ser una fuente rica en nutrientes, especialmente nitrógeno (64 g, 80% amoniacal) y potasio (214 g), mejorando la producción de forraje sin alterar su composición química, digestibilidad ni contenido mineral

La información proporcionada a través de la Revista Brasileña de Ciencia Animal, R. Bras.Zootec.40 por Amorim Orrico y otros (2011), sobre biodigestión anaerobia de desechos de cabras Saanen alimentadas con distintas proporciones de forraje y concentrado. Evaluaron el efecto de la edad animal y la dieta en la digestión anaeróbica del estiércol, usando excretas de cabras de 90, 120 y 150 días con dietas 80:20, 60:40 y 40:60. Se emplearon biodigestores discontinuos con 12 litros de sustrato y 8% de sólidos totales iniciales para medir producción de biogás y metano, reducción de sólidos volátiles y contenido mineral. Las mayores reducciones de sólidos volátiles se dieron en heces de cabras de 150 días con dieta 40:60. Los mejores rendimientos se obtuvieron con estiércol de cabras de 120 y 150 días con dieta 40:60. Las mayores concentraciones minerales se observaron en cabritos de 150 días alimentados con dieta 40:60.

Barros Gómez, Dangond Rodríguez y Bastidas Barranco (2017), en su tesis sobre el aprovechamiento del estiércol caprino como recurso biomásico para producir biogás, toman como referencia la comunidad Yutaho en Cuatro Vías, La Guajira. Abordan el problema ambiental causado por el uso de combustibles fósiles y la tala de leña, proponiendo el biogás

como alternativa energética renovable. El objetivo fue evaluar la viabilidad del estiércol caprino como fuente de biomasa en comunidades rurales, considerando que Yutaho cuenta con 95 cabras y produce 152 kg diarios de estiércol. La metodología fue una revisión teórica descriptiva, con análisis documental, cálculos energéticos y comparación de especies animales. Los resultados mostraron que el estiércol caprino tiene características aptas para la digestión anaerobia, y que el biodigestor tubular es el más eficiente. Se concluye que esta tecnología puede sustituir la leña, reducir la deforestación y mejorar la calidad de vida en zonas rurales sin servicios públicos, posicionando al biogás como una solución viable y sostenible.

2.2. Nacionales - Locales

En el estudio realizado para la evaluación de viabilidad de sustrato caprino Orozco Hernández y otros (2022), presentaron resultados favorables en biodigestión anaeróbica. Se evaluó la generación de biogás mediante co-digestión anaerobia no controlada, utilizando excretas de vacuno, caprino y lactosuero como sustratos en biodigestores a escala de laboratorio. La investigación, de enfoque cuantitativo y método experimental, aplicó la norma APHA/SM 2540-B para caracterizar los residuos y operó bajo condiciones mesofílicas (20 °C a 24 °C), obteniendo valores de pH dentro de rangos óptimos. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, evidenciando la viabilidad técnica del uso de excretas caprinas en procesos de biodigestión, lo cual aporta fundamentos relevantes para el diseño y validación de sistemas energéticos en contextos rurales.

3. Planteamiento del problema

3.1. Caracterización del problema

La Agencia Internacional de Energía (2023), en su informe sobre emisiones globales de dióxido de carbono, advierte que en 2022 se alcanzó un récord de 36.8 gigatoneladas de CO₂, impulsado por el uso de carbón, gas natural y gases licuados del petróleo como el butano y el propano, ampliamente utilizados en zonas rurales sin acceso a energías renovables. Aunque estos combustibles son considerados más limpios que el carbón, su uso sostenido sigue generando emisiones significativas.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2006), establece que el propano emite aproximadamente 63.1 kg de CO₂ por gigajulio (GJ) consumido, mientras que el butano alcanza los 65.5 kg CO₂/GJ, lo que evidencia su impacto ambiental cuando se emplean como fuente principal de energía doméstica.

Metz y otros (2007), señalan que la quema de combustibles fósiles en sistemas no controlados contribuye directamente al efecto invernadero, afectando la salud humana y los ecosistemas. En comunidades rurales, esta práctica suele combinarse con la tala de leña, intensificando la deforestación y la pérdida de cobertura vegetal.

La información presentada por el Instituto Nicaragüense de energía (2022), el consumo final de energía en Nicaragua, el sector residencial representa el 44.5 % del total, siendo la leña el energético predominante con un 84.7 % del consumo en 2020, equivalente a 979.4 miles de toneladas de petróleo. El 80 % de esta leña se utiliza exclusivamente para cocinar, especialmente en zonas rurales donde el acceso al GLP es limitado por razones económicas y logísticas.

3.2. Delimitación del problema

El Café Las Cabritas, ubicado en el departamento de Estelí, realiza actividades gastronómicas y agropecuarias que generan residuos orgánicos, siendo el estiércol de cabra el principal subproducto del sistema productivo. Este residuo es desechado al aire libre sin ningún tipo de tratamiento, lo que provoca procesos de descomposición anaerobia que liberan metano, un gas de efecto invernadero altamente contaminante. Además de representar un riesgo ambiental por escorrentía y contaminación de fuentes de agua, el estiércol no está siendo aprovechado como recurso energético, a pesar de su alto potencial metanogénico. Paralelamente, la cafetería depende del uso de gas butano para la cocción de alimentos el cual se estima en un consumo mensual de diez cilindros de gas de 25 libras, lo cual implica un gasto económico elevado debido al constante aumento de precios y a los costos de transporte desde la ciudad de Estelí. Esta situación evidencia una problemática técnica y operativa: la falta de un sistema que permita transformar el estiércol de cabra en biogás útil para cubrir la demanda energética térmica del establecimiento.

3.3. Formulación del problema

Con base en la caracterización y delimitación previamente desarrolladas, se establece la siguiente interrogante central que orienta el presente estudio: ¿Cómo diseñar un sistema de biodigestión anaerobia que permita aprovechar las excretas caprinas como fuente energética para cubrir la demanda energética del Café Las Cabritas, en Estelí, durante el año 2025?

3.4. Sistematización del problema

A continuación, se presentan las preguntas de sistematización que orientan el desarrollo del presente estudio

- ¿Cuál es la demanda energética de gas en el Café Las Cabritas de Estelí para la cocción de alimentos?
- ¿Cuál es la disponibilidad de excretas caprinas como sustrato orgánico para la producción de biogás
- ¿Cómo dimensionar técnicamente un sistema de biodigestión anaerobia capaz de satisfacer la demanda energética de gas?
- ¿Cuál es la viabilidad económica-financiera y ambiental de la propuesta energética?

4. Justificación

La presente investigación se orienta al diseño y desarrollo de un sistema de biodigestión anaerobia para el Café Las Cabritas de Estelí, como respuesta técnica y contextualizada a las necesidades energéticas del establecimiento. Este proyecto se fundamenta en el análisis de la demanda de biogás para aplicaciones térmicas, en la caracterización del sustrato orgánico disponible y en el dimensionamiento técnico del biodigestor requerido, con el propósito de garantizar una solución energética sostenible, eficiente y adaptada a las condiciones locales.

Realizar esta investigación resulta conveniente por múltiples razones. En primer lugar, permite aprovechar los residuos orgánicos generados en el sitio como fuente energética renovable, reduciendo la dependencia de combustibles convencionales y promoviendo la autosuficiencia energética. En segundo lugar, contribuye a la gestión responsable de los desechos, mitigando impactos ambientales y fortaleciendo prácticas de economía circular en el ámbito rural.

La importancia de este estudio radica en su enfoque técnico aplicado, que integra conocimientos de ingeniería energética con criterios de sostenibilidad y pertinencia social. Al caracterizar la demanda energética real del establecimiento y diseñar un sistema ajustado a dicha demanda, se garantiza la viabilidad operativa del biodigestor y se promueve el uso racional de los recursos disponibles. Además, el estudio aporta una metodología replicable para otros emprendimientos rurales que enfrentan desafíos similares en cuanto a acceso energético.

El Gobierno de Nicaragua (2022), en el Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano (PNLPDH), vincula directamente el acceso a tecnologías limpias con la mejora de las condiciones de vida en zonas rurales. Desde una perspectiva social, la relevancia de esta investigación se relaciona con dicho plan, al fomentar soluciones como la biodigestión, que contribuyen a reducir el gasto energético de las familias, mejorar la seguridad alimentaria mediante la cocción eficiente de alimentos y generar subproductos como el bioabono, fortaleciendo la producción agrícola local.

El Ministerio de Educación de Nicaragua (2022), en su Estrategia Nacional de Educación en todas sus modalidades “Bendiciones y Victorias” 2024–2026, promueve el aprendizaje técnico aplicado, la innovación en energías renovables y el desarrollo de competencias profesionales en el campo de la ingeniería. Asimismo, el proyecto se alinea con estos principios al representar un ejemplo concreto de cómo la formación académica puede traducirse en soluciones reales para el desarrollo sostenible del país, fortaleciendo el vínculo entre educación, tecnología y transformación social.

El aporte de esta investigación es doble: por un lado, ofrece una solución energética viable y contextualizada para el Café Las Cabritas; por otro, genera conocimiento técnico que puede ser transferido a otros espacios educativos, productivos y comunitarios. En conjunto, el estudio contribuye al fortalecimiento de capacidades locales, a la promoción de tecnologías limpias y al cumplimiento de los objetivos nacionales en materia de desarrollo humano, educación y sostenibilidad.

5. Objetivos de investigación

5.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de biodigestión anaerobia para el aprovechamiento de excretas caprinas y la cobertura de la demanda energética en el Café Las Cabritas, Estelí, durante el año 2025.

5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la demanda energética de gas destinada a la cocción de alimentos.

- Caracterizar la disponibilidad de excretas caprinas como sustrato orgánico para la producción de biogás.

- Dimensionar el sistema de biodigestión anaerobio para satisfacción de la demanda energética de gas.

- Determinar la viabilidad económica-financiera y ambiental de la propuesta Energética.

6. Limitaciones del estudio

Dentro de estas restricciones generales se identifican limitaciones importantes: la aplicación directa de los resultados está restringida al contexto particular del Café Las Cabritas, lo que dificulta su extrapolación a otros entornos sin estudios adicionales. El uso exclusivo de excretas caprinas impidió explorar mezclas con otros residuos orgánicos que podrían optimizar la producción. El estudio se realizó en un momento específico, sin seguimiento longitudinal, y se limitó a cubrir la demanda energética de cocción de alimentos. Además, la metodología empleada priorizó el análisis cuantitativo y experimental, dejando de lado variables sociales o cualitativas.

A estas restricciones se suman las limitaciones prácticas en la validación experimental. Las pruebas con biodigestores tipo *batch* se realizaron con un número reducido de muestras y en condiciones controladas de laboratorio, lo que restringe la representatividad estadística y la posibilidad de extrapolar resultados a escalas mayores. Los análisis se centraron en parámetros básicos como humedad, sólidos totales y volátiles, sin incluir otros indicadores relevantes como DQO (Demanda Química de Oxígeno), pH, alcalinidad o composición detallada del biogás. Asimismo, la variabilidad natural de las excretas caprinas y la escala experimental reducida afectan la reproducibilidad y el comportamiento real del sistema, mientras que la disponibilidad limitada de equipos y el tiempo de prueba relativamente corto impidieron caracterizaciones más profundas. Estas limitaciones refuerzan la necesidad de considerar los resultados como un diagnóstico inicial defendible, pero sujeto a validaciones adicionales en futuras investigaciones

7. Hipótesis

El aprovechamiento exclusivo de excretas caprinas en el Café Las Cabritas permitirá generar biogás y reducir el uso de combustibles fósiles para la cocción de alimentos.

8. Operacionalización de Variables

Objetivo general: Diseñar un sistema de biodigestión anaerobia para el aprovechamiento de excretas caprinas y la cobertura de la demanda energética en el Café Las Cabritas, Estelí, durante el año 2025.

Objetivos Específicos	Variable conceptual	Dimensiones/Sub variables	Indicador	Instrumento			Tipo de variable
				encuesta	observación	cálculos	
Caracterizar la demanda energética de gas destinada a la cocción de alimentos	Demanda energética de gas	Demanda energética de gas para la cocción de alimentos	Consumo de gas en m ³	✓			Cuantitativa continua
			Numero de equipos que utilizan gas	✓	✓		Cuantitativa discreta
			Horas de uso por equipo. h/día	✓	✓		Cuantitativa continua
			Demanda futura m ³ /mes	✓		✓	Cuantitativa continua
Caracterizar la disponibilidad de excretas caprinas como	Disponibilidad de excretas caprinas	Disponibilidad de excretas caprinas como sustrato orgánico para la	Cantidad diaria de excretas caprinas (kg/día)	✓			Cuantitativa continua

sustrato orgánico para la producción de biogás		producción de biogás	Número de animales en producción de excremento	✓	✓		Cuantitativa discreta
			Frecuencia de recolección de excretas (veces/semana)	✓			Cuantitativa continua
			Fracción orgánica biodegradable (SV) m ³ /kg			✓	Cuantitativa continua
			Humedad y relación C/N del sustrato			✓	Cuantitativa continua
			Volumen de biogás generado en condiciones controladas de prueba (m ³ /día)		✓	✓	Cuantitativa continua
Dimensionar el sistema de biodigestión	Sistema de biodigestión anaerobio	Sistema de biodigestión anaerobio para la	Relación entre producción de			✓	Cuantitativa continua

anaerobio para la satisfacción la demanda energética de gas.		satisfacción demanda energética de gas	biogás y demanda energética (m ³ /día)				
			Producción diaria estimada de biogás (m ³ /día)			✓	Cuantitativa continua
			Volumen útil del biodigestor (m ³)			✓	Cuantitativa continua
			Tipo de digestor seleccionado			✓	Cuantitativa discreta
			Volumen útil del biodigestor			✓	Cuantitativa continua
			Capacidad de carga orgánica (Kg)			✓	Cuantitativa continua
			Dimensiones y componentes críticos (m, cm)			✓	Cuantitativa continua
Determinar la viabilidad económica-	Viabilidad de la propuesta energética	Viabilidad económica-financiera	Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR)			✓	Cuantitativa continua

financiera y ambiental de la propuesta Energética.			Tiempo estimado para recuperar el costo del sistema			✓	Cuantitativa continua
			Diferencia entre gasto actual y ahorro proyectado			✓	Cuantitativa continua
		Viabilidad ambiental	Capacidad mensual de generación de biogás (m ³)			✓	Cuantitativa continua
			Cálculo de emisiones de CO ₂			✓	Cuantitativa continua
			Tratamiento de lodos		✓		Cuantitativa discreta

9. Marco Teórico

9.1. Digestión Anaeróbica

La información presentada por Ministerio de energía de Chile (2011), detalla los conceptos base sobre la digestión anaeróbica la digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g. H_2 O_2). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria, fermentativa, papelera y químicas, en subproductos útiles.

En la digestión anaerobia más del 90 % de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10 % de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50 % consumido en un sistema aeróbico. En la digestión anaeróbica, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema; sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo.

El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación anaeróbica o digestión anaeróbica dependiendo del tipo de aceptores de electrones.

9.2. Fundamentos de la fermentación metanogénica

9.3. Etapas de la fermentación metanogénica

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea (Wiley, 2008).

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

- 1. Hidrólisis**
- 2. Etapa fermentativa o acidogénica**
- 3. Etapa acetogénica**
- 4. Etapa metanogénica**

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H_2 y CO_2 .

En la figura 1 se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.

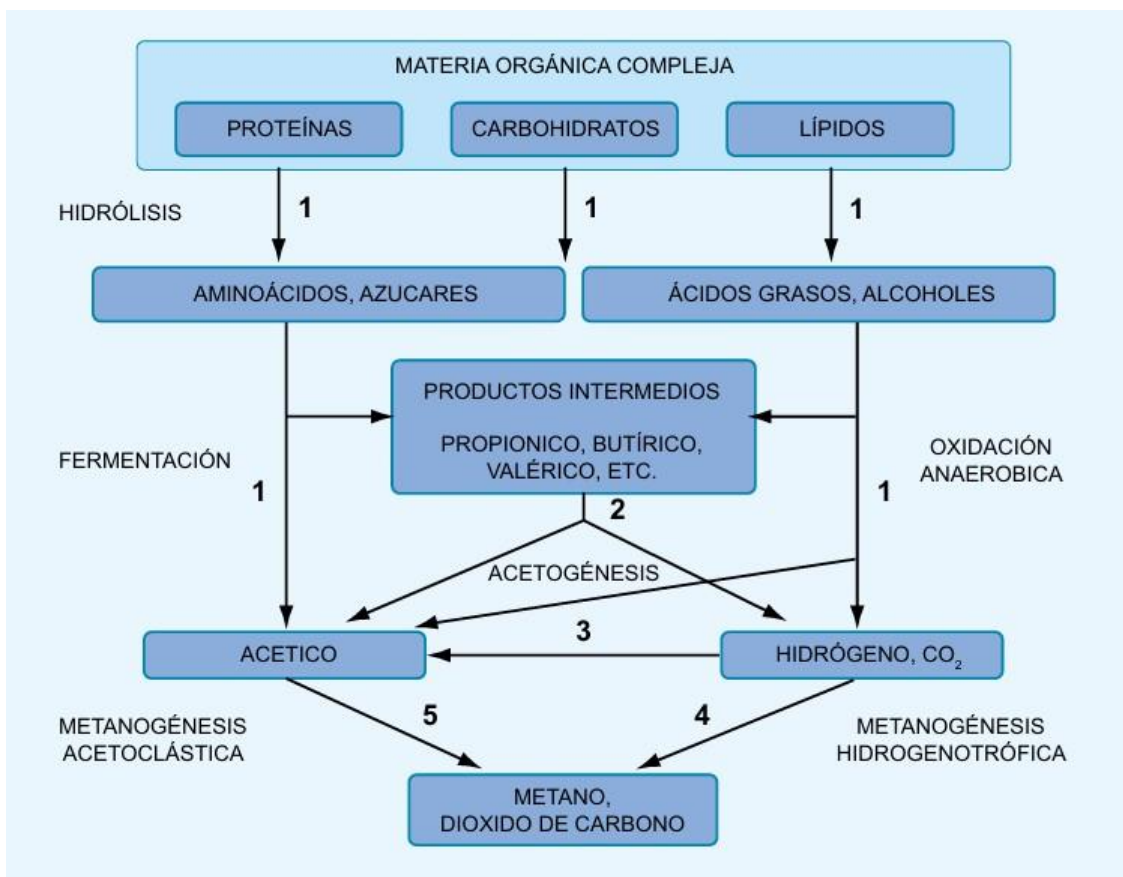
Hidrólisis

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para

la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), tamaño de partículas, nivel de pH, concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales



Fuente: (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991)

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1 bacterias fermentativas; 2 bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3 bacterias homoacetogénicas; 4 bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5 bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores.

Etapas fermentativa o acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no

sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, si no que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato ($CH_3 COO^-$) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2 / CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas.

Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

Etapa metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos

anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2 / CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2 / CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanothrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.

9.4. Tipo de materia prima

La rapidez y eficiencia del proceso de descomposición de la materia orgánica por medio de la fermentación metanogénicas está condicionada por los siguientes factores.

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, alimenticias en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio,

calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) (Hilbert, 2007).

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico (Hilbert, 2007).

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina. En lo atinente a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias entre distintos autores.

Como norma se deberá tomar en cuenta que a raíz de estar trabajando en un medio biológico sólo los promedios estadísticos de una serie prolongada de mediciones serán confiables siempre y cuando figuren las condiciones en las cuales fueron realizadas las pruebas. En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo fundamentalmente al peso y al tipo de alimentación y manejo de los mismos. Cuando se encare un proyecto específico se recomienda realizar una serie de mediciones en el lugar donde se emplazará el digestor.

9.5. Valor de acides (PH).

Otro factor limitante en el proceso de digestión anaerobia es el pH, ya que este afecta directamente la actividad enzimática de los microorganismos, los resultados encontrados en los artículos consultados revelan que la mayoría de los microorganismos se desarrollan óptimamente en pH entre 6.8 a 7.2. No obstante, este factor no puede generalizarse, debido a que está directamente influenciado por el tipo de sustrato utilizado. En primera instancia se define el pH como una medida de la concentración de hidrógeno expresado en términos logarítmicos. Los valores del pH se reducen a medida que la concentración de los iones de hidrógeno incrementa, variando entre un rango de 0 a 14. Los valores por debajo 7.0 son

ácidos, valores superiores a 7.0 son alcalinos y/o básicos, mientras que los que rondan 7.0 son denominados neutros (Meza García, 2011). Existen varios métodos para medir el valor del pH, dentro de los más destacados se encuentran: papel tornasol o tiras medidoras, pH metro digital, gotas indicadoras o rojo fenol, entre otros.

Según estudios desarrollados por Guarda Puebla (2012), el pH es una importante variable para la fase de hidrólisis-acidificación, los valores de PH inferiores a 5 afectan considerablemente la producción de los ácidos orgánicos, siendo los valores cercanos a pH 6 los más adecuados para obtener altos niveles de esos compuestos en esta fase. Coincide en afirmar que el pH tiene una influencia importante en la digestión anaerobia ya que afecta la solubilización de materias orgánicas. El máximo rendimiento de metano se ha observado manteniendo un pH entre 6,8 y 7.2. Microorganismos hidrogenantes y ácido génicos prefieren valores dentro del rango de 5.5 y 6.5. Sin embargo, el pH óptimo para el microorganismo metano génico está cerca 7.0, y las reacciones anaeróbicas son altamente dependientes del pH, siendo el rango óptimo para las bacterias metano génicas entre 6.8 a 7.2. (Guarda Puebla, 2012). El afirma que las condiciones óptimas para la producción de metano a partir de mucílago de café son pH 8.2 y concentración de azúcar 27 gL⁻¹.

Tal como se muestra en las referencias de investigaciones más recientes, se evidencia que los valores de pH son tendientes a trabajar en rangos un poco más ácidos, debido a que en las etapas de ácido génesis y acetogénesis se forman ácidos carboxílicos o ácidos débiles, dentro de los que se destacan el ácido acético y el ácido propanoico; e incluso en la etapa metano génica, es evidente la formación de estados de equilibrio, dándose consigo la formación del ácido carbónico, sin embargo, cabe recordar que este tipo de sistemas de equilibrio con el ion carbonato tienden a alcalinizar los sistemas, por ello, es de gran importancia conocer la acidez/basicidad del sustrato de partida. Se tienen reportes que el café posee una acidez que oscila entre 1-4.84, por lo que es importante establecer que dependiendo del tipo de residuos se busquen reguladores De pH con la capacidad amortiguadora suficiente para controlar el sistema. En la Tabla 4 se explican claramente los distintos estudios reportados para este residuo agroindustrial y los rangos de pH encontrados.

9.6. Composición de la materia orgánica

Valdivia (2000), Propone para la fermentación los microorganismos metano génicos requiriendo de suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa, el porcentaje más adecuado de contenido en sólidos es del 5% al 10% lo que indica que la biomasa más adecuada es la de alto contenido en humedad.

Durante la digestión se encuentra que no toda materia prima se digiere, si no que parte se convierte en metano, otra en sedimento y habrá también una porción que no se digiere, esta y otras propiedades básicas de la materia se expresan casi siempre como sigue:

9.7. Humedad

Cantidad de agua existente en la materia a utilizar. Se obtiene al secarse el material a 104°C, hasta que no pierda peso; la diferencia entre el peso inicial y el peso final es equivalente a la humedad que contenía la materia (Valdivia, 2000).

9.8. Sólidos totales

Materia orgánica sin humedad, es decir, el peso de la materia seca que queda después del secado como se indicó antes. El sólido total suele ser equivalente al peso en seco (sin embargo, si se secan los materiales al sol, es de suponer que aun contendrán, cerca del 30% de humedad). El sólido total incluye componentes digeribles o “sólidos volátiles” y residuos no digeribles o “sólidos fijos” (Valdivia, 2000).

9.9. Sólidos volátiles (SV)

Los sólidos volátiles son considerados como la materia que realmente es transformada por las bacterias. Es el peso de los sólidos orgánicos quemados cuando el material seco se enciende (se calienta unos 538 °C) (Valdivia, 2000).

9.10. Sólidos fijos (SF)

Material que no será transformado durante el proceso y es el peso que queda después del encendido (cenizas), se trata de material biológicamente inerte. Los sólidos fijos son el residuo de los sólidos totales, disueltos o suspendidos, después de llevar una muestra a sequedad durante un tiempo determinado a 550°C (Valdivia, 2000).

9.11. Principales utilidades del Biogás

La generación eléctrica: La conversión de la energía contenida en el biogás a energía eléctrica se hace a través de unos motores generadores alimentados por el biogás. La electricidad generada puede alimentar las instalaciones de la explotación agrícola o venderse a la red eléctrica general.

Uso directo como gas: El biogás es posible también emplearlo de manera directa en los vehículos y maquinaria adaptados para el consumo de gas en lugar de gasolina, gasóleo

Solución mixta: Por último, también es posible optar por una solución mixta, empleando parte del biogás para generar electricidad y otra parte utilizarla de forma directa (Hernandez, 2015).

9.12. Biogás.

Biogás, es un gas inflamable, producido por estiércol de ganado, cerdos y otras materias orgánicas. Este es un producto que no produce humo y además es un combustible muy eficiente. Este puede ser usado para cocinar, iluminar y para otros motivos de energía (Family size bio- Gas plant- Code of practice , 1998).

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano, dióxido de carbono & pequeñas proporciones de otros gases, éste puede ser utilizado de diferentes maneras.

Para la producción de biogás es necesaria la digestión anaerobia. Esta descomposición de la materia orgánica produce un gas combustible, este gas contiene una alta proporción en metano, este proceso se lleva a cabo en digestores de metano, plantas de biogás o simplemente reactores anaeróbicos, este tipo de fermentación, no es más que un tipo de fermentación catalizada por bacterias específicas. Mediante el proceso de anaerobia puede tratarse un gran número de residuos, entre estos: Agrícolas & ganaderos, lodos de depuradoras biológicas, residuos industriales orgánicos, aguas residuales & residuos urbanos

9.12.1. Biodigestor o digestor.

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales-no se

incluyen cítricos ya que acidifican-, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio (Hernandez Ruiz, 2009).

Es un recipiente o tanque, de forma cilíndrica o esférica, cerrado, hermético e impermeable, que puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico. Está compuesto por tres cámaras:

Cámara de carga: Contiene un conducto de carga por donde se suministra la materia orgánica ayudada por un sistema de bombas utilizando agua extraída del mismo digestor.

Cámara de digestión: Aquí se realiza la digestión por parte de las bacterias anaeróbicas, las cuales transforman la biomasa (materia orgánica) en biogás. Dentro de la misma, existe un agitador, el cual permite mover la masa de digestión, logrando así un mejor contacto entre la biomasa que ingresa y las bacterias, además de ayudar a desprender las burbujas de biogás las cuales se dirigen a la campana de acumulación de gas.

Cámara de descarga de residuos: Se utiliza para extraer el material sólido remanente o material estabilizado (es decir, que ya no seguirá degradándose biológicamente), depositado en el fondo de la cámara de digestión junto con el agua. El material extraído es un buen abono para la tierra y el agua es utilizada para riego, en cantidades estrictamente limitadas. **Campana de acumulación o gasómetro:** Es un dispositivo para captar y almacenar el biogás, luego el mismo es extraído a través de válvulas situadas en la parte superior de la misma. Estas válvulas están conectadas a un sistema de mangueras que lo transportan hasta el lugar de uso, por ejemplo, una cocina (Martinez T. , 2014).

9.13. Propiedades energéticas del biogás.

Las propiedades del biogás se deben a la presencia del gas metano como combustible principal y del hidrogeno en proporción al contenido de los mismos (Biblioteca del Campo, 1998).

La combustión es muy limpia dando como productos finales bióxido de carbono y agua que no son contaminantes; por esta razón se dice que el biogás es un combustible ecológico.

El poder calorífico del biogás está comprendido entre 4.500 y 6.000 kilocalorías/m³ dependiendo de su composición”.

9.14. Tipos de biodigestores

Biodigestores por Lotes (Discontinuos)

Descripción: Estos biodigestores se cargan una sola vez con desechos orgánicos y se sellan hasta que el proceso de digestión anaeróbica se completa. Una vez que se ha producido el biogás y el digestato, se vacían y se vuelven a cargar.

Ventajas: Menor requerimiento de agua, adecuados para materiales poco diluidos.

Desventajas: Producción de biogás no continua.

Biodigestores Continuos

Descripción: Estos sistemas se alimentan continuamente con desechos orgánicos y producen biogás de manera constante. Son ideales para instalaciones que generan residuos orgánicos de manera regular.

Ventajas: Producción continua de biogás.

Desventajas: Requieren un suministro constante de agua y desechos.

Biodigestores de Mezcla Completa

Descripción: En estos biodigestores, los desechos se mezclan completamente con el contenido existente, lo que permite una digestión más uniforme.

Ventajas: Mayor eficiencia en la producción de biogás.

Desventajas: Requiere un sistema de mezcla eficiente.

Biodigestores de Domo Fijo

Descripción: Este tipo de biodigestor tiene una estructura fija y robusta, generalmente construida de concreto. El biogás se almacena en un domo fijo en la parte superior.

Ventajas: Alta durabilidad y vida útil.

Desventajas: Costos de construcción relativamente altos.

Biodigestores de Domo Flotante

Descripción: En estos biodigestores, el domo que almacena el biogás flota sobre el líquido digestato, ajustándose al volumen de gas producido.

Ventajas: Fácil de operar y mantener.

Desventajas: Menor capacidad de almacenamiento de biogás.

9.15. Aspectos físico Químicos

9.15.1. Temperatura en el biodigestor

La información presentada por Kumar (2008) detalla información relevante a cuento a la temperatura de operación de los biodigestores. Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

Tabla 1. Relación de temperaturas y tiempos de retención hidráulica

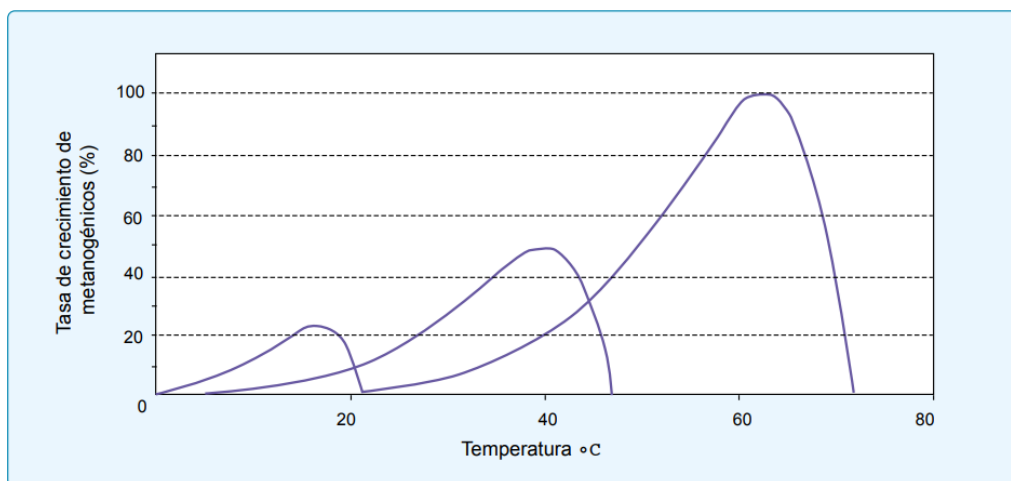
Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psycrophilica	4- 10 °C	15- 18 °C	20- 25 °C	Sobre 100 días
Mesophilica	15- 20 °C	25- 35 °C	30- 45 °C	20- 60 días
Thermophilica	25- 45 °C	50- 60 °C	75- 80 °C	10-15días

Fuente: (Hernández Rueda, M. 2021)

Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos (Tabla 1): psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (Figura 2).

Figura 2. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesofílicos y termofílicos



Fuente: (Speece, 1983)

9.16. Relación carbono/nitrógeno de las materias primas.

La información presentada por Bennardi (2010), presenta detalles relevantes sobre la relación carbono/nitrógeno. Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, $C/N = 30/1$. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas.

10. Diseño Metodológico

10.1. Tipo de investigación

La información presentada Hernández Sampieri y otros, (2014), detalla aspectos relevantes para el fortalecimiento de estudios. La investigación se clasifica como explicativa, ya que busca determinar las causas técnicas que justifican el diseño de un sistema de biodigestión anaerobia para el aprovechamiento de excretas caprinas. Este tipo de estudio permite establecer relaciones causales entre variables cuantificables, como la disponibilidad de sustrato orgánico, la demanda energética térmica y la capacidad de producción de biogás. En el enfoque cuantitativo, la investigación explicativa se orienta a responder el “por qué” de los fenómenos mediante el análisis de datos medibles y verificables.

La información presentada por Organización de Estados Iberoamericanos (2013), detalla aspectos clave para determinar ámbitos fundamentales de la investigación. La presente investigación se inscribe en el ámbito de las ciencias aplicadas, específicamente en el área científica de las energías renovables. Se adscribe a la línea de investigación en energías renovables, con énfasis en la sub-línea de aprovechamiento energético de residuos agropecuarios, al abordar el potencial metanogénico de las excretas caprinas como fuente alternativa para la generación de biogás. En cuanto a su modalidad, se trata de una investigación científica aplicada, dado que se orienta a la resolución de una problemática técnica concreta mediante el diseño de un sistema funcional de biodigestión anaerobia. Desde el enfoque cuantitativo, este tipo de investigación permite operacionalizar variables energéticas y ambientales, aplicar principios científicos verificables y generar soluciones prácticas, evaluables y replicables en contextos reales.

La investigación se clasifica como de tipo experimental, dado que se realizaron pruebas controladas para evaluar la producción de biogás a partir de excretas caprinas bajo condiciones específicas. En este proceso se manipularon variables como la carga orgánica, el tiempo de retención y los parámetros operativos del sistema de biodigestión, con el objetivo de obtener datos cuantificables que permitieran analizar el comportamiento del sustrato en condiciones determinadas. Desde el enfoque cuantitativo, el diseño experimental se caracteriza por la intervención directa sobre variables independientes, permitiendo

observar sus efectos mediante procedimientos sistemáticos de medición y control (Hernández Sampieri y otros, 2014).

La investigación se clasifica como de tipo experimental, dado que se realizaron pruebas controladas para evaluar la producción de biogás a partir de excretas caprinas bajo condiciones específicas. En este proceso se manipularon variables como la carga orgánica, el tiempo de retención y los parámetros operativos del sistema de biodigestión, con el propósito de observar el comportamiento del sustrato en función de condiciones previamente definidas. Desde el enfoque cuantitativo, este tipo de investigación se caracteriza por la intervención directa sobre variables independientes, permitiendo obtener resultados observables y verificables que fundamentan técnicamente el desarrollo del sistema propuesto (Madrid, Universidad Politécnica de, 2022).

El estudio tiene un alcance transversal, ya que la recolección de datos y el diseño técnico se realizaron en un momento específico: el año 2025. No se contempla un seguimiento temporal de las variables, sino un diagnóstico puntual que permite dimensionar el sistema de biodigestión con base en condiciones actuales. En el enfoque cuantitativo, la investigación transversal permite analizar variables en un único punto temporal, facilitando la toma de decisiones técnicas con base en datos actuales (Lifeder, 2023).

Según la Universidad de Barcelona (2022), el paradigma empírico-analítico busca la objetividad, la replicabilidad y la validación empírica de los resultados, siendo el más adecuado para investigaciones de carácter técnico-científico. La investigación se sustenta en el paradigma empírico-analítico, propio del enfoque cuantitativo. Este paradigma se basa en la observación sistemática, la medición objetiva y el análisis estadístico de variables técnicas. En este estudio, se aplican principios científicos verificables para explicar el comportamiento del sistema de biodigestión y justificar su diseño.

10.2. Población y selección de la muestra

La información presentada por Tamayo (1997), detalla información clave para la estructuración del modelo de población y selección de muestra. El universo o población se define como el conjunto total de elementos, casos u objetos que poseen características comunes y sobre los cuales se desea obtener información.

En el presente estudio, la población directa está constituida por el flujo mensual de visitantes del Café Las Cabritas, ubicado en el departamento de Estelí, que asciende a aproximadamente 400 personas. Este dato permite dimensionar con precisión la demanda energética térmica del establecimiento, vinculada principalmente a la cocción de alimentos.

De forma contextual, se identifican cinco establecimientos rurales en el departamento de Estelí con características similares al Café Las Cabritas, que combinan actividades agropecuarias y gastronómicas, generan residuos orgánicos aprovechables y dependen del uso de gas butano para sus operaciones. Estos establecimientos —como Ecos Estelí, Finca El Jalacate, Finca La Aurora, Finca El Recuerdo y Finca Agroecológica La Esperanza— representan una población de referencia útil para valorar la replicabilidad del sistema propuesto.

La muestra seleccionada para el estudio es el Café Las Cabritas, por su representatividad, condiciones reales y disposición para implementar soluciones energéticas sostenibles. Este establecimiento cuenta con un hato caprino activo, espacio físico disponible, acceso a agua y generación constante de excretas caprinas frescas, lo que lo convierte en un caso idóneo para el diseño y validación de un sistema de biodigestión anaerobia.

Como parte del proceso experimental, se llevaron a cabo tres pruebas controladas utilizando biodigestores tipo batch a escala reducida, con mezclas de excretas caprinas frescas y agua en proporciones de 1:2, 1:3 y 1:4. Estas pruebas permitieron evaluar el comportamiento del sustrato bajo diferentes relaciones de dilución, en condiciones ambientales homogéneas, facilitando el monitoreo técnico del proceso.

La selección de esta muestra responde a criterios de pertinencia técnica, operativa y contextual, permitiendo caracterizar con precisión las variables clave para el diseño del sistema de biodigestión. Asimismo, esta delimitación garantiza que la propuesta se

fundamente en datos reales, condiciones específicas del sitio y criterios de aplicabilidad directa, fortaleciendo su viabilidad técnica y su potencial de réplica en otros espacios rurales del municipio.

10.2.1. Características del área de estudio

Google Earth (2024) brinda ubicación exacta de las áreas de estudio. El café las cabritas está ubicado en la región de Estelí, negocio destinado a brindar servicios en el área de atención al cliente basado en el modelo de café familiar.

Ubicaciones geográficas.

- **Longitud:** -86°20'18"W
- **Latitud:** 13°08'25"N
- **Altitud a nivel del mar:** 812 msnm

Figura 3. Ubicación geográfica del café las cabritas



10.3. Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos

La recolección de datos constituye una fase esencial en el proceso investigativo, ya que permite obtener la información necesaria para caracterizar las variables técnicas involucradas en la propuesta de dimensionado del sistema de biodigestión anaerobia. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), las técnicas e instrumentos deben seleccionarse en función del tipo de estudio, los objetivos específicos y la naturaleza de los datos requeridos.

En esta investigación se implementa un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo-aplicado, orientado a la obtención de datos reales sobre la demanda energética térmica del Café Las Cabritas y la disponibilidad de excretas caprinas como sustrato para la producción de biogás.

10.3.1. Técnicas aplicadas

Se emplearon tres técnicas principales:

Observación directa estructurada: permitió registrar visualmente las condiciones físicas del sitio, el tipo de cocina utilizada, la frecuencia de uso del sistema de cocción y las prácticas de manejo de excretas. Esta técnica facilita la identificación de variables técnicas en su contexto real, clasificando los elementos observados según un esquema previamente definido (Valverde Calero, 2019).

Entrevista semiestructurada: aplicada al personal operativo del café, con el objetivo de obtener información sobre el consumo energético, la generación de estiércol y las rutinas de limpieza del corral caprino. Esta técnica permitió complementar los datos observados con percepciones y experiencias prácticas.

10.3.2. Instrumentos utilizados y su diseño

Cada técnica fue aplicada mediante instrumentos específicos, diseñados para garantizar la validez y confiabilidad de los datos recolectados:

Tabla 2. Instrumentos utilizados

Técnica	Instrumento	Descripción del diseño
Observación directa estructurada	Guía de observación técnica	Formato con ítems cerrados y escala de verificación para registrar tipo de quemadores, número de servicios diarios, condiciones del terreno y del corral.
Entrevista semiestructurada	Formato de entrevista	Cuestionario mixto (preguntas abiertas y cerradas) dirigido al personal del café, enfocado en prácticas energéticas, manejo de estiércol y consumo de gas.
Encuestas reestructuradas	Formato de entrevistas	Cuestionario cerrado aplicado a los clientes del café, diseñado para identificar hábitos de consumo energético, frecuencia de visita y percepción sobre el uso de tecnologías limpias

Los instrumentos fueron elaborados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, lo que permitió organizar las variables cuantitativas discretas (número de animales, frecuencia de uso) y continuas (consumo mensual de gas en kg, volumen diario de excretas en litros). Posteriormente, se estructuró una base de datos para el análisis técnico y energético del sistema propuesto.

10.3.3. Procedimiento de aplicación

El proceso de recolección de datos se desarrolló en las siguientes etapas:

Coordinación previa con los responsables del “Café Las Cabritas” para definir fechas de visita y acceso a la información.

Aplicación de la guía de observación en el sitio, registrando datos técnicos y operativos del sistema de cocción y del entorno físico.

Realización de entrevistas al personal encargado del manejo energético y agropecuario, siguiendo el formato establecido.

Sistematización de la información en matrices de análisis que permiten dimensionar el sistema propuesto con base en criterios técnicos reales.

10.4. Confiabilidad y validez de los instrumentos

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, por lo que se aplicaron criterios básicos de confiabilidad y validez para garantizar la calidad de los datos recolectados.

- **Confiabilidad:** Los instrumentos fueron diseñados de forma estructurada, con preguntas cerradas y escalas claras que permiten obtener respuestas consistentes. Se aplicaron en condiciones controladas dentro del sitio de estudio, lo que redujo la variabilidad en la recolección de datos.
- **Validez:** La validez de contenido se garantizó mediante la correspondencia directa entre los objetivos específicos, las variables operacionalizadas y los ítems incluidos en los instrumentos. Los indicadores utilizados responden a parámetros técnicos reconocidos en estudios previos sobre biodigestión y demanda energética.
- **Aplicación controlada:** Todos los instrumentos fueron aplicados directamente en el Café Las Cabritas, lo que permitió contextualizar los datos y asegurar que la información recolectada reflejara las condiciones reales del establecimiento.

10.5. Técnicas, instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos.

El procesamiento y análisis de los datos se realizó exclusivamente mediante técnicas cuantitativas, utilizando herramientas digitales, cálculos técnico-operativos y parámetros reconocidos en estudios sobre biodigestión anaerobia.

Procesamiento de datos

Los datos recolectados mediante encuestas, observaciones y registros fueron organizados y tabulados en hojas de cálculo Excel.

Se aplicaron conversiones de unidades técnicas (libra a kilogramo, kilogramo a metro cúbico) para estandarizar los valores energéticos.

Los registros de producción de excretas caprinas fueron sistematizados por frecuencia semanal y acumulación mensual, permitiendo estimar el volumen disponible como sustrato energético.

Análisis técnico-operativo

Se aplicaron fórmulas de dimensionamiento para calcular el volumen útil del biodigestor, el tiempo de retención hidráulica (TRH), la producción diaria estimada de biogás y la capacidad de carga del sistema.

Se utilizó modelación funcional para simular escenarios de cobertura energética, eficiencia operativa y viabilidad del sistema propuesto.

Los parámetros técnicos fueron validados mediante comparación con literatura científica y estándares internacionales aplicables al diseño de sistemas de biodigestión.

Herramientas utilizadas

Hojas de cálculo técnicas para procesamiento numérico y proyecciones energéticas.

Tablas de composición química del estiércol caprino (nitrógeno, fósforo, potasio) para estimar el potencial metanogénico.

- Sensores conectados a Arduino para el monitoreo de variables críticas como temperatura, humedad y pH en tiempo real.

11. Análisis y discusión de resultados

11.1. Caracterización la demanda energética de gas destinada a la cocción de alimentos

Para caracterizar la demanda energética de gas destinada a la cocción de alimentos, se adoptó una metodología similar a la empleada en la evaluación del consumo de café en el área de estudio, considerando variables como la proporción de población usuaria, la frecuencia semanal de uso y el consumo unitario por sesión. Esta lógica permitió estimar el volumen anual de gas requerido por hogar, proyectando el total en función del número de familias que cocinan con este recurso. Dicho enfoque facilita una cuantificación precisa de la demanda energética actual, indispensable para el análisis técnico y la formulación de soluciones sostenibles como la biodigestión anaerobia

11.1.1. Evaluación del consumo actual y proyectado en el área de estudio.

A través del levantamiento de información en el área de estudio se pudo determinar la demanda y consumo de gas actual en la parte residencial y en el negocio café “las cabritas” donde se proyectaron los valores de consumo en ambos sitios de:

La información recopilada sobre la evaluación del consumo actual en el café “las cabritas” se aprecian en los siguientes datos.

◆ Gas usado: 10 tanques de gas butano de 25 lb al mes con un margen de dos días (Café las cabritas). Para el consumo en m³ de un cilindro de gas de 25 lb sería:

11.1.2. Determinación del volumen del gas en condiciones estándar:

- El gas butano tiene una densidad aproximada de 2.522 kg/m³ a condiciones estándar (0°C y 1 atm).

Conversión libras a kilogramos:

- 1 lb \approx 0.453592 kilogramos.
- Por lo tanto, 25 lb \approx 25 \times 0.453592 = 11.34 kg. **ec.1**

Calcular el volumen: Si la densidad del gas es de 2.522 kg/m³, entonces el volumen ocupado por 11.34 kg de gas será:

$$volumen = \frac{masa}{densidad} = \frac{11.34 \text{ kg.}}{2.522 \text{ kg/m}^3} = 4.49 \text{ m}^3 \quad ec.2$$

Cálculo del consumo de gas en m³ por persona de la población diaria que frecuenta el café.

La población diaria sería de 17 personas y el consumo diario la mitad de un cilindro de 12.5 lb

Población: 17 personas

Por lo tanto, 12.5 lb \approx 12,5 \times 0.453592 = 5.66 kg.

Consumo diario: 2.24 m³

$$volumen = \frac{masa}{densidad} = \frac{5.66 \text{ kg.}}{2.522 \text{ kg/m}^3} = 2.24 \text{ m}^3$$

$$\text{Consumo por persona} = \frac{\text{consumo diario}}{\text{poblacion diaria}} \quad ec.3$$

$$\text{Consumo por persona} = \frac{2.24 \text{ m}^3}{17} = 0.13 \text{ m}^3$$

Cálculo Del consumo de gas en m³ mensualmente de la población diaria que frecuenta el café.

La población mensual sería de 400 personas y el consumo mensual sería de 10 cilindros de 25 lb de gas, que combinados serían 250 lb.

Población: 400 personas

Por lo tanto, 250 lb \approx 250 \times 0.453592 = 113.39 kg.

Consumo mensual: 44.96 m³

$$volumen = \frac{masa}{densidad} = \frac{113.39 \text{ kg.}}{2.522 \text{ kg/m}^3} = 44.96 \text{ m}^3$$

$$\text{Consumo por persona} = \frac{\text{consumo mensual}}{\text{poblacion mensual}}$$

$$\text{Consumo por persona} = \frac{44.96 \text{ m}^3}{400} = 0.11 \text{ m}^3$$

11.1.3. *Proyección del crecimiento población*

La información presentada por Colegio villa Flor (2019) muestra la tasa de crecimiento poblacional. La tasa de crecimiento poblacional en Nicaragua es del 5% anualmente.

La proyección de crecimiento poblacional aproximadamente crece un 5 % anual durante 5 años.

Crecimiento Anual Compuesto: $P_t = P_0 = (1 + R)^t$ *ec.4*

Donde:

P_t = Población en el tiempo = ¿? r = Tasa de crecimiento poblacional (5 % = 0,05)

P_0 = población inicial 400 t = Número de años (5 año)

$$P_t = 400 \times (1 + 0,05)^1 = 510 \text{ personas}$$

11.1.4. *Estimación del consumo de gas mensual a futuro*

La población mensual sería de 510 personas y el consumo mensual sería de 10 cilindros que combinados serían 250 lb.

$0.11 \text{ m}^3 / \text{mes} * 510 \text{ personas} = 56.1 \text{ m}^3 / \text{mes}$. *ec.6*

11.1.5. Análisis del tamaño de la población, hábitos de consumo de gas y variaciones temporales en el uso de gas para la cocción de alimentos

A través del análisis de datos y parámetros relevantes, se identificó el tamaño de la población del área de estudio. Otro método clave fue la realización de visitas y entrevistas a los propietarios del lugar. Además, se determinó la cantidad de personas que visitan el café diariamente y mensualmente, así como el consumo de gas en cilindros de 25 lb, y la variabilidad de este consumo según el movimiento de personas en cada mes de operación.

Tabla 3. Consumo de gas y personas que visitan el café diaria y mensualmente.

Días	Mes	dia
24	Gas usado en hogar lb mes	Gas usado en hogar lb día
Cantidad de animales	25	1.04
80	Gas usado en la café lb mes	Gas usado en la café lb día
	250	10.42
	Cientes del café mes	Cientes del café día
	400	17
	Trabajadores del lugar mes	Trabajadores del lugar mes día
	7	7
	Excretas lb al mes	Excretas lb al día
	2400	100
	Factor de consumo de gas por persona	0.625 m ³

Se determinaron aspectos fundamentales relevantes en el análisis de parámetros de consumo, tales como las visitas de las personas al local durante los diferentes meses del año, donde se evidencian diferencias basadas en la demanda de los productos del lugar. Además, se correlacionó el consumo de gas en libras y metros cúbicos, así como su coste, con las visitas al café “las Cabritas”.

Tabla 4. consumo de gas, costos y visitas de personas al café las cabritas en los primeros 5 meses del año.

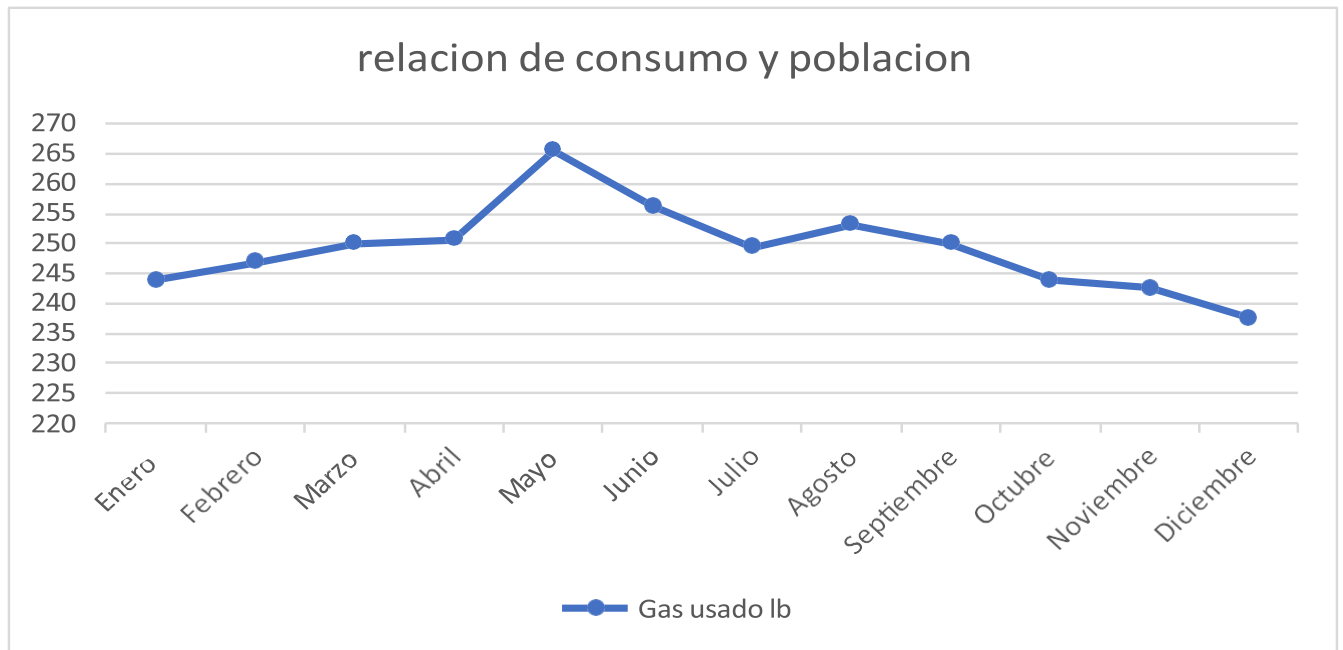
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Personas	390	395	400	401	425
Gas usado lb	243.75	246.875	250	250.625	265.625
Tanques de 25 lb	9.75	9.875	10	10.025	10.625
Kilogramos	110.54	111.96	113.38	113.66	120.46
Gas en m ³	43.83	44.39	44.96	45.07	47.77
Costo	5362.5	5431.25	5500	5513.75	5843.75
Gas por persona lb	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625
Gas por persona m ³	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11

Tabla 5. Consumo de gas, costos y visitas de personas al café las cabritas en los últimos 7 meses del año.

Mes	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Personas	410	399	405	400	390	388	380
Gas usado lb	256.25	249.375	253.125	250	243.75	242.5	237.5
Tanques de 25 lb	10.25	9.975	10.125	10	9.75	9.7	9.5
Kilogramos	116.21	113.10	114.80	113.38	110.54	109.98	107.71
Gas en m ³	46.08	44.84	45.52	44.96	43.83	43.61	42.71
Costo	5637.5	5486.25	5568.75	5500	5362.5	5335	5225
Gas por persona lb	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625
Gas por persona m ³	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11

En la figura 4 se plasma la relación entre las personas que visitan el café y el consumo de gas, basados en los doce meses del año donde se evidencia una decaída en el primer mes y el último mes del año.

Figura 4. Relación consumo y población en los doce meses en el café las



Para la evaluación de costos se tomó en cuenta el consumo de gas butano que se utiliza en el café, con un seguimiento de los mese hábiles se refleja el consumo de los 10 cilindros de gas en cada mes proyectando, así de esta manera se evidencia el gasto económico, además a través de la conversión de libras a kilogramos podremos identificar el cual es el volumen del gas en metro cúbicos.

Figura 5. Volumen en metros cúbicos de gas al año

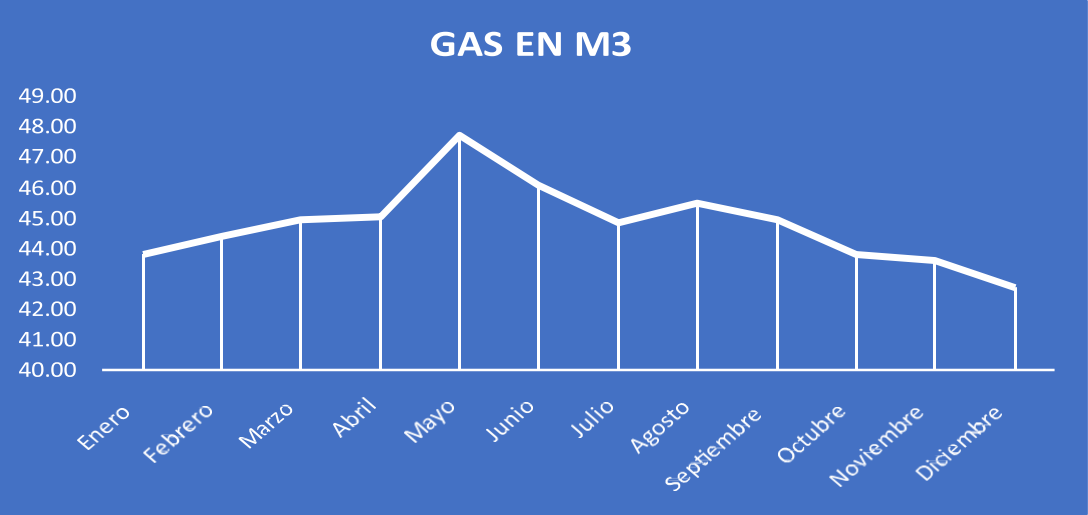
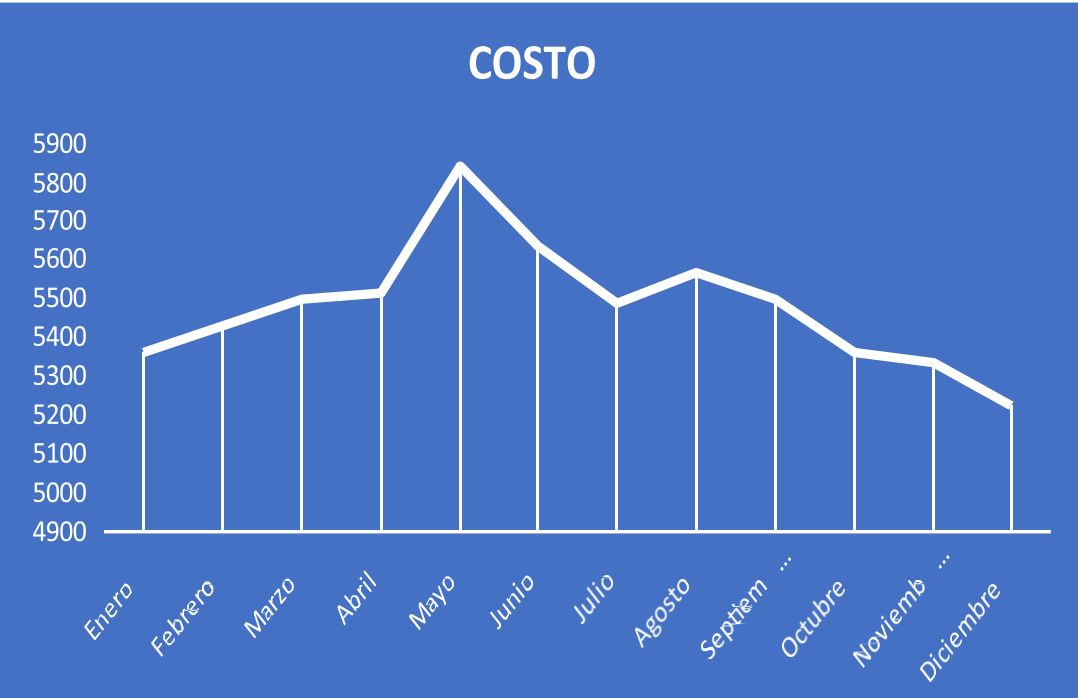


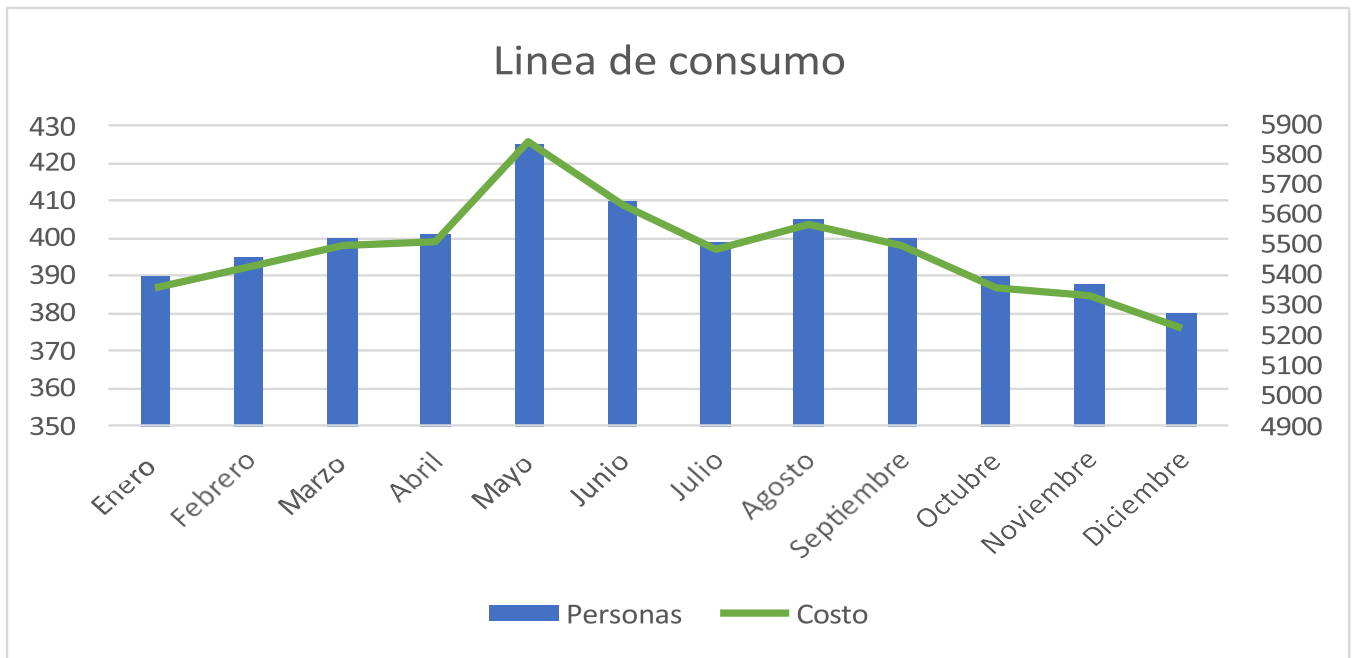
figura 6. Evaluación de costos de biogás en el año



11.1.6. La relación entre flujo de visitantes, consumo de gas y costos operativos.

Para una mayor comprensión de los resultados obtenidos se plasmó en un gráfico unificado, en este se puede notar como los datos proporcionan un margen de mayor y menor consumo, gracias a eso la proyección que se puede realizar es más precisa, ya que teniendo en cuenta la forma en la que se comporta dicha línea se comprende que en los meses de abril y junio hay un pico de mayor consumo y costo, tanto monetario como consumo de gas, esto nos permite realizar un dimensionado siguiendo dicha línea de consumo (figura 7).

Figura 7. Gráfico unificado basado en la población, consumo y costos



11.2. Caracterización de la disponibilidad de excretas caprinas como sustrato orgánico para la producción de biogás

Mediante la observación directa del hato caprino y la entrevista aplicada al personal responsable, se registró la cantidad de animales, el tipo de alimentación y la frecuencia de recolección de excretas. Los indicadores utilizados permitieron estimar el volumen diario de excretas caprinas frescas disponibles, considerando únicamente el estiércol sin mezcla con otros residuos. Esta información fue sistematizada para evaluar la oferta potencial de sustrato, tomando en cuenta condiciones físicas como acceso, sombra y espacio disponible, lo que permitió validar la viabilidad técnica del proceso de biodigestión.

11.2.1. Fuentes de residuos orgánicos en el sitio de estudio

En la ciudad de Estelí departamento de Estelí, camino a Miraflor se encuentra una finca con un restaurante del tipo cafetería donde tienen múltiples alimentos a base de derivados de la cabra, de ahí parte la se obtendrá la materia prima.

El lugar cuenta con una población de cabras de 80 unidades, divididas en zonas cerradas para diferenciar su edad y calidad, la producción neta de excretas de dicho animal es de 100 L al día, lo que proporciona 45.35 kg, dicha materia actualmente se utiliza como abono.

En el sitio de estudios se cuentan con instalaciones que facilitan la recolección de las excretas para la realización de la limpieza de sus corrales, dicha estructura se pretende aprovechar para facilitar la obtención diaria del material para su posterior uso.

Además de una estructura que fue utilizada para lombricultora que permite tener una zona donde fácilmente puede ser recolectado los residuos para la adaptación a un sistema de generación de biogás, lo que significa que el lugar tiende condiciones que permitirían dicho sistema.

11.2.2. Volumen, frecuencia de generación y la composición de residuos.

El lugar cuenta con una producción de excretas de cabras de 100 lb diarias o 2,400 lb al mes, dicha materia contiene alrededor de 7 % de nitrógeno, 2 % de fósforo, 10 % de potasio, además de todos los oligoelementos, suele llevar también pelos del animal, lo que le aporta más nitrógeno. Para llevar a la información ya antes mencionada se logró de la siguiente manera

11.2.2.1. Volumen de Residuos

Identificación de Fuentes: Identificó las fuentes generadoras de residuos en el área de interés, donde las cabras son los animales que se utilizaran como referencia para el trabajo.

Medición Directa: se tomó en cuenta la cantidad de residuos producidos en el café los por animales en este caso las cabras Si es posible podemos determinar el peso del excremento producido por las cabras.

11.2.3. Frecuencia de Generación

Mediante los datos obtenidos por registro histórico de un año se plasmaron las cantidades de excremento producidos por las cabras en el café.

Recopilación de Datos: Se plasma la siguiente tabla con los valores de producción aproximado de excremento de las cabras en el café las cabritas durante el año 2023.

Los valores consignados en las tablas corresponden al promedio diario de generación total de materia fecal por el conjunto de cabras, estimado para cada mes del año en estudio. Estos datos no representan la producción acumulada mensual, sino una referencia estandarizada por día, utilizada para dimensionar con mayor precisión la carga orgánica disponible en función del tiempo

Tabla 6. Promedio diario de generación total de excretas caprinas por mes (lb/día)

Enero [lb]	Febrero [lb]	Marzo [lb]	Abril [lb]	Mayo [lb]	Junio- Noviembre [lb]	Diciembre [lb]
100	100	100	100	110	115	100

Tabla 7. Pico de producción de excremento Junio/noviembre

Pico de producción [lb]		Total
Abril	Mayo	210
100	110	

Tabla 8. Promedio de los meses de

Promedio [lb]		
Junio	Noviembre	115

Con base en los promedios diarios de generación de materia fecal registrados para cada mes, se realizó una estimación de la producción mensual total considerando un mínimo de 24 días efectivos de actividad por mes. Este criterio responde a condiciones operativas reales del sistema caprino, excluyendo días no productivos por factores climáticos, sanitarios o logísticos. La estimación permite proyectar con mayor precisión la disponibilidad de carga orgánica para procesos de digestión anaerobia.

Tabla 9. Generación total de excretas caprinas por mes

Mes	Promedio diario [lb/día]	Días considerados	Producción mensual estimada [lb]
Enero	100	24	2,400
Febrero	100	24	2,400
Marzo	100	24	2,400
Abril	110	24	2,640
Mayo	120	24	2,880
Junio- Noviembre	115	24	2,760
Diciembre	100	24	2,400

11.2.4. Determinación de la fracción orgánica biodegradable mediante sólidos volátiles (SV)

Para verificar la disponibilidad de excretas caprinas como sustrato orgánico para la producción de biogás, se realizó la caracterización fisicoquímica básica del material, determinando su concentración de sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV). La muestra de estiércol caprino fue secada a 125 °C, obteniéndose un peso seco de 90 g/L, correspondiente a los ST. Posteriormente, se calcinó a 520 °C, registrando 35 g/L de residuos inorgánicos, equivalentes a los SF. A partir de estos datos, se calculó una concentración de sólidos volátiles de 55 g/L, lo que representa la fracción orgánica potencialmente biodegradable en condiciones anaerobias. Este valor confirma que el estiércol caprino posee una proporción significativa de materia orgánica susceptible de transformación en biogás, validando su disponibilidad como sustrato energético.

$$SV = ST - SF \quad ec.7$$

Donde.

SV es la concentración de sólidos volátiles en mg/L o g/L

ST son los sólidos totales.

SF son los sólidos fijos

Sólidos totales (ST):

La muestra de estiércol se seca a 125°C y tiene un peso seco de 90 gramos

El volumen de la muestra es de 1 L.

los sólidos totales serian

$$ST = \frac{90 \text{ g}}{1 \text{ L}} = 90 \text{ g / L} \quad ec.8$$

Sólidos fijos (SF):

La muestra seca se calcina a 520°C, y el peso de los residuos inorgánicos (cenizas) es de 35 gramos

figura 8. Materia de pruebas



Entonces, los sólidos fijos serían:

$$SF \frac{35g}{1L} = 35 \text{ g / L} \quad ec.9$$

Sólidos volátiles (SV)

Ahora, calculamos la concentración de sólidos volátiles restando los sólidos fijos de los sólidos totales:

$$SV = ST - SF = 90\text{g/L} - 35 \text{ g/L} = 55 \text{ g/L}$$

Esto significa que la concentración de sólidos volátiles es de 55 g/L, lo que indica que la fracción orgánica de los residuos (que puede ser descompuesta en biogás) es de 55 g/L

11.2.5. Composición de Residuos

Análisis de Muestras: las muestras representativas de los residuos se utilizaron para realizar análisis de laboratorio con el propósito de determinar la composición. Esto incluye la proporción de materia orgánica, contenido de carbono, nitrógeno, humedad, y otros parámetros relevantes.

Métodos Comunes de Análisis:

Análisis de Humedad: Para calcular la cantidad de agua en los residuos se realizó un laboratorio para cuantificar el nivel de humedad en el sustrato.

Figura 9. Muestra del



Tabla 10. Datos de laboratorio basados en pruebas de humedad.

	Pruebas de humedad			
Cabras	peso de la materia [g]	peso antes [g]	peso después [g]	perdida [g]
Adultas	249.47	11	5	6
Jóvenes	337.92	11	4	7

11.2.6. Evaluación experimental de la capacidad de generación de biogás

Se construyeron tres prototipos de biodigestores tipo Batch con capacidad de 20 litros, empleando botellas plásticas como reactores principales. Cada biodigestor fue alimentado con una mezcla de estiércol de cabra y agua en proporciones distintas: 1:2, 1:3 y 1:4 (una parte de estiércol por dos, tres y cuatro partes de agua, respectivamente). Estas variaciones permitieron evaluar el efecto de la dilución sobre la producción de biogás.

En la parte superior de cada biodigestor se realizó una perforación para la salida del biogás, conectada mediante mangueras, válvulas y llaves de paso hacia un neumático que funcionó como gasómetro flexible. Este sistema permitió observar visualmente la acumulación de gas y estimar su volumen.

En la parte inferior se incorporó una válvula de descarga para el biol (efluente líquido), permitiendo su extracción sin interrumpir el proceso anaerobio. Además, se instalaron sensores de temperatura y pH: el primero en contacto directo con el contenido del digestor, y el segundo en la salida del líquido, con el fin de monitorear los parámetros críticos del proceso (rango óptimo de pH: 6.8–7.5).

Durante la operación, se registraron periódicamente los valores de temperatura y pH en cada biodigestor, permitiendo comparar la estabilidad del proceso y la eficiencia de producción de biogás según la proporción de mezcla utilizada.

Figura 10. Unidad experimental



Análisis de temperatura y pH en la producción de biogás.

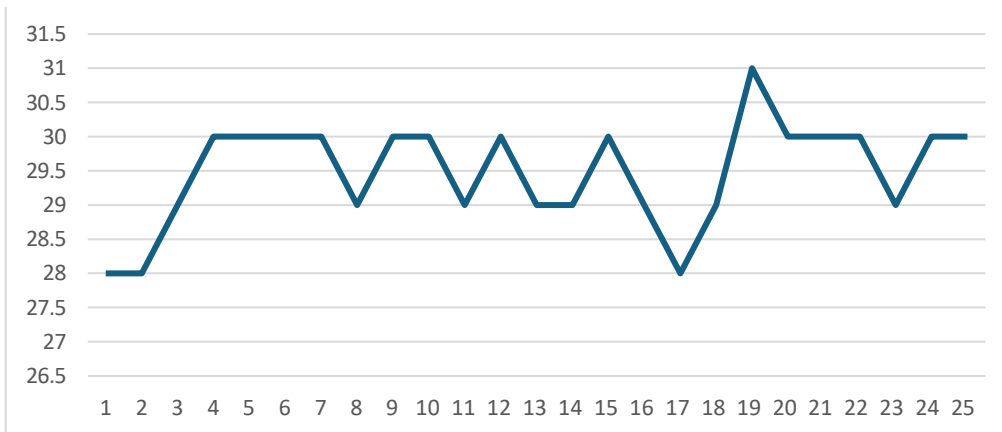
Temperatura

La medición de la temperatura del biodigestor se realizó utilizando un termómetro digital, el cual se encontraba insertado directamente en la parte superior del sistema. Las lecturas se efectuaron una vez al día durante un período de 25 días consecutivos, con el propósito de determinar el régimen de operación térmica del biodigestor.

Tabla 11. Recopilación de datos de la temperatura

Días	Promedio de temperatura
1-8	30
8-16	29
16-25	30

Figura 11. Temperaturas registradas



Durante 25 días se midió diariamente la temperatura del biodigestor con un termómetro digital, asegurando homogeneidad en las lecturas. Los valores oscilaron entre **27 °C y 31 °C**, con un mínimo de 27 °C en los dos primeros días y un máximo de 31 °C en los días 6 y 19.

En promedio, la temperatura fue de **29.5 °C**, manteniéndose dentro del rango **mesofílico (25–40 °C)**, considerado óptimo para la digestión anaerobia.

Este comportamiento térmico estable favoreció la actividad de las bacterias metanogénicas y permitió una producción constante y eficiente de biogás.

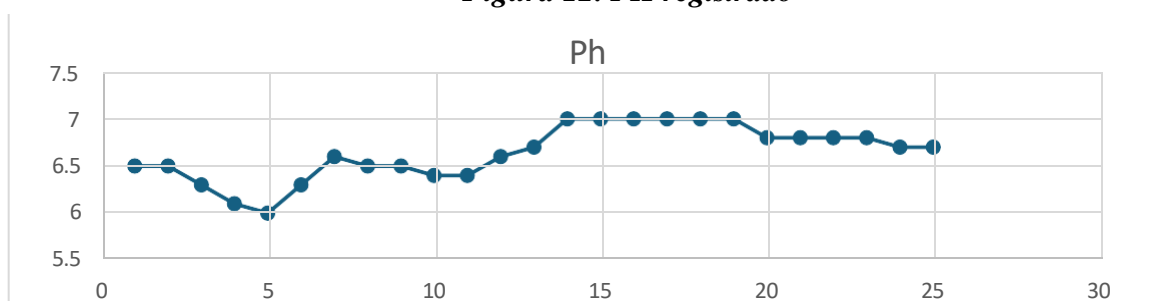
PH

Para la medición del pH del biodigestor, se utilizaron tiras indicadoras de pH. Las muestras se tomaron a través de la llave de paso ubicada en la salida del biodigestor, con el fin de evitar la pérdida del biol y la posible entrada de gases del ambiente al sistema.

Tabla 12. Recopilación de datos del PH

Días	Promedio pH
1-8	6.5
8-16	6.7
16-25	6.9

Figura 12. PH registrado



Durante 25 días se realizaron mediciones diarias del pH del biodigestor, utilizando la salida mediante la llave de paso para evitar la entrada de gases externos o la pérdida de biol. El objetivo fue monitorear el comportamiento del proceso de digestión anaerobia y asegurar mayor eficacia en la producción de biogás y biol.

Los valores de pH oscilaron entre 6.0 y 7.0, rango ligeramente ácido a neutro que resulta adecuado para la actividad de las bacterias metanogénicas. En los primeros días se registraron valores más bajos (6.0–6.5), correspondientes a la fase de acidificación por la generación de ácidos grasos volátiles. A partir del día 12, el pH se estabilizó entre 6.7 y 7.0, reflejando una fase metanogénica estable y favorable para la eficiencia del biodigestor.

Los resultados evidencian que el sistema mantuvo un comportamiento estable y eficiente, logrando un equilibrio óptimo del pH para el desarrollo del proceso biológico

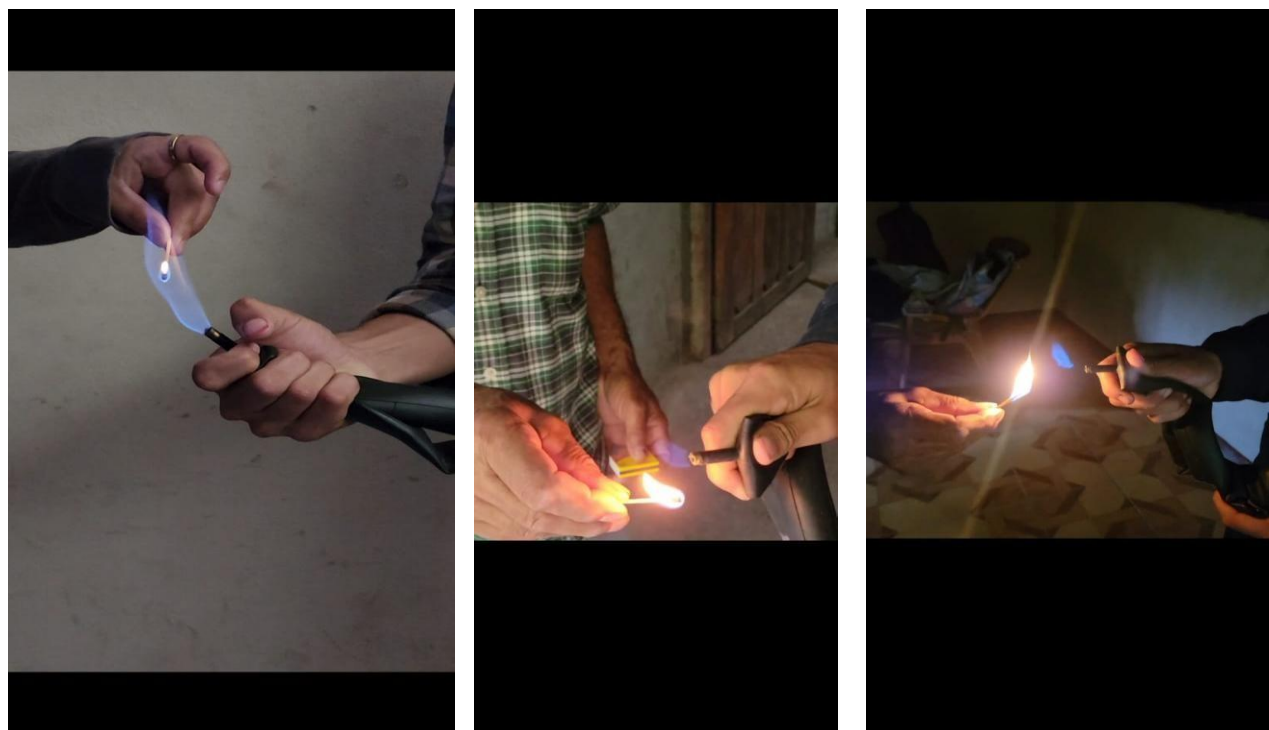
Resultados experimentales de la producción de biogás en biodigestores tipo batch con sustrato caprino

Con base en el diseño experimental previamente descrito, se presentan a continuación los resultados correspondientes a las tres proporciones de mezcla evaluadas (1:2, 1:3 y 1:4) en biodigestores tipo batch alimentados con sustrato caprino. Cada muestra fue monitoreada durante un período de 25 días, registrando parámetros clave como temperatura, pH y acumulación de biogás.

Los datos obtenidos permiten observar el comportamiento del sistema en cada mezcla, identificando variaciones en la estabilidad térmica, la evolución del pH y el rendimiento en la producción de biogás. Esta información es esencial para comprender cómo influye la dilución del sustrato en la eficiencia del proceso anaerobio.

A continuación, se detallan los resultados por muestra, acompañados de gráficos y tablas que facilitan la comparación entre las condiciones operativas y el desempeño de cada biodigestor

Figura 13. Prueba de llamas de las tres mezclas evaluadas.



11.3. Dimensionamiento el sistema de biodigestión anaerobio para satisfacción de la demanda energética de gas.

Con base en la demanda energética caracterizada y la disponibilidad de sustrato, se procedió al cálculo del volumen requerido del biodigestor. Se consideraron parámetros técnicos como la carga diaria, el tiempo de retención hidráulica y el rendimiento estimado de producción de biogás por kilogramo de excretas caprinas. El análisis permitió establecer la capacidad mínima del sistema, así como las condiciones operativas necesarias para garantizar su eficiencia. Este dimensionamiento se fundamenta en datos reales obtenidos mediante instrumentos validados, y busca asegurar la cobertura energética del establecimiento mediante una solución renovable, contextualizada y técnicamente viable.

11.3.1. Sistema Propuesto

11.3.2. Cálculo la cantidad de sustrato a utilizar

La información presentada por Martinez (2013) muestra el valor de la densidad del estiércol de cabra. Para el cálculo de la cantidad de sustrato a utilizar se realizó de la siguiente manera con los datos obtenidos

ρ = Densidad m = masa V = volumen

La densidad del estiércol de cabra equivale a 800 kg/m^3

La cantidad de sustrato producido en un día equivale a 100 lb

Por lo tanto, 100 libras $\approx 100 \times 0.453592 = 45.35 \text{ kg}$ **ec.10**

Cálculo de volumen de mezcla con agua 1:3

$45.35 \text{ kg} + 135 \text{ L} = 181.35 \text{ kg}$ **ec.11**

11.3.3. Volumen de sustrato

$$\text{volumen} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{180.35 \text{ kg.}}{800 \text{ kg/m}^3} = 0.23 \text{ m}^3$$
 ec.12

El volumen de la cantidad de sustrato a utilizar es de 0.23 m^3 / (cantidad en m^3 de estiércol producido diariamente mezclado en una proporción 1:3 con agua

11.3.4. Cálculo del volumen total del biodigestor

La información presentada por Sosa (2015), muestra datos relevantes sobre las temperaturas de operación y el tiempo de retención hidráulica en la tabla 9. Para el cálculo de volumen del biodigestor se tomaron en cuantos datos primordiales como lo son:

Tabla 13. Datos de tiempo de retención hidráulica y temperatura según el tipo de región.

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (Días)
Trópico	30	20
Valle	20	38
Altiplano	10	60

(Barros Gómez y otro, 2022)

TRH: Tiempo de Retención Hidráulica

SDA: Sustrato Diario a Utilizar

V: Volumen del biodigestor

Vfinal: Volumen del biodigestor final

Volumen del biodigestor: Volumen diario de entrada * Tiempo de retención Hidráulica. ec.10

$$\text{TRH} = \frac{\text{Volumen del biodigestor}}{\text{Volumen diario de entrada}} \quad \text{TRH} = \frac{4.51 \text{ m}^3}{0.23 \text{ m}^3} = 20 \text{ días} \quad \text{ec.13}$$

$$V_{\text{biodigestor}} = 0.23 \text{ m}^3 * 20 = 4.51 \text{ m}^3$$

Además, se aplica un factor de seguridad del 15% al volumen calculado de 4.51 m³

$$V_{\text{biodigestor final}} = 4.51 \text{ m}^3 * 1.15 = 5.19 \text{ m}^3$$

El volumen total del biodigestor es de 5.19 m³, acorde a la cantidad del volumen de materia que entra

Para medidas exactas se tomará un valor de 6 m³ para el volumen de biodigestor.

Donde se aplica un 75 % para el almacenamiento de la biomasa y un 25 % para la el biogás producido

Gas en el biodigestor m ³ 25 %	1.30 m ³
Materia al 75 %	3.91 m ³

11.3.5. Cálculo del tamaño del biodigestor

Para el cálculo del tamaño del tamaño del biodigestor se tomaron en cuenta valores necesarios tales como el volumen del mismo

Donde tendremos en cuenta los siguientes valores

A área: π : 3.1416 r: radio h: altura

d: diámetro V: volumen

A: $\pi * r^2$ ec.14

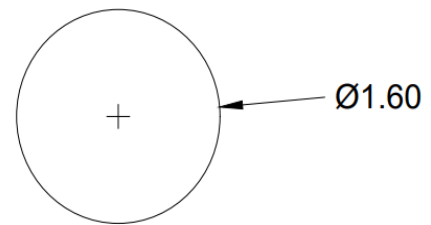
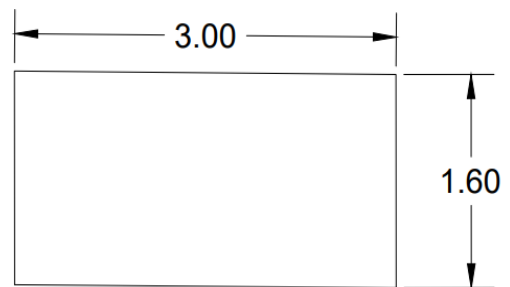
$$A = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad V = \frac{\pi \times d^2}{4} h \quad V = \frac{\pi (2.0)^2}{4} 3$$

$$6 = \frac{\pi \times d^2 * 3}{4} \quad 24 = \pi \times d^2 * 3$$

$$d^2 = \frac{24 \text{ m}^3}{\pi * 3 \text{ m}} \quad d^2 = \frac{24 \text{ m}^3}{9.42 \text{ m}} \quad d = \sqrt{2.54 \text{ m}^2} = 1.60 \text{ m}$$

Denotando de la siguiente manera las dimensiones del reactor con un diámetro de 1.60 m y una altura de 3 m con un volumen total final de 6 m³

Figura 14. dimensiones del biodigestor



11.3.6. Cálculo de la capacidad de carga del biodigestor

La información presentada por Torres (2006), revela datos necesarios para el cálculo de los sólidos volátiles y para el cálculo de la carga del biodigestor. La concentración de sólidos volátiles (SV): Los sólidos volátiles se calculan restando los sólidos fijos de los sólidos totales. Esto representa la fracción orgánica de los sólidos, que es la parte que se descompone en el biodigestor para producir biogás.

Con los valores previamente obtenidos de sólidos volátiles (SV), equivalentes a 55 kg/m³, se procedió al cálculo de la capacidad de carga del biodigestor, entendida como la cantidad de materia orgánica biodegradable introducida por unidad de volumen cada día. Utilizando un caudal diario de alimentación de 0.23 m³/día y un volumen útil del biodigestor de 5.19 m³, se aplicó la fórmula:

Formula general para la capacidad de carga

La capacidad de carga se calcula mediante la formula siguiente

$$C_{\text{organica}} = \frac{Q \text{ diaria} * S \text{ volatil}}{V \text{ biodigestor}} \quad \text{ec.15}$$

$$C_{\text{organica}} = \frac{0.23 \text{ m}^3/\text{dia} * 55 \text{ kg/m}^3}{5.19 \text{ m}^3} = 2.43 \text{ kg SV/m}^3/\text{ dia}$$

La capacidad de carga del biodigestor seria de 2.43 kg SV/m³/ dia

El valor obtenido indica cuanta materia orgánica se está introduciendo por cada metro cubico del biodigestor al dia.

11.3.7. Dimensiones del biodigestor

Diámetro de la Entrada:

Normalmente entre 15 cm y 20 cm, dependiendo del flujo deseado y el tipo de sustrato

Altura de la Entrada:

Puede estar a nivel del suelo o ligeramente elevada, entre 0.5 m y 1.0 m.

Diámetro y altura de entrada para el biodigestor

Diámetro: 15 cm

Altura: 0.9 m

Dimensiones de salida de lodo para un biodigestor tipo tubular:

Normalmente entre 5 cm y 100 cm, dependiendo del diseño y del flujo de lodo.

Altura de la Salida:

Generalmente a nivel del suelo o ligeramente elevada, entre 5 cm y 10 cm.

Diámetro: 8.5 cm

Altura: 0.7 m

11.3.8. Producción de biogás esperada

El índice de la producción específica de biogás a partir de cabras se ve reflejada en el documento de Aprovechamiento racional de desechos orgánicos (Arellano & Varnero, 1990). Para el cálculo de biogás esperado en un biodigestor, se deben tener en cuenta varios factores, tales como el tipo de sustrato, la producción específica de biogás y las condiciones de operación.

La producción específica de biogás en cuanto a cabras equivale a 0.05 m^3 por kg de estiércol y el contenido de sólidos volátiles es de un 70 % porcentaje de material que es biodegradable.

Cálculo

Se calcula la producción de biogás sin el porcentaje de sólidos volátiles

Datos

Producción de biogás.

Cantidad de residuos kg/día

Producción específica de biogás m^3/kg de residuo

Tabla 14. Producción específica de biogás a partir de distintos sustratos

Estiércol	Disponibilidad Kg/día*	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m ³ /kg húmedo	m ³ /día/año
Bovino (500 kg)	10.00	25:1	0.4	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves (2 kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino (32 kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino (50 kg)	2.00	40:1	0.05	0.100
Esquino (450 kg)	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo (3 kg)	0.35	13:1	0.06	0.21
Excretas humanas	0.40	3:1	0.06	0.025

(Bennardi, 2010)

Producción de biogás = Cantidad de residuos combinados con agua (kg/día) * Producción específica de biogás (m³/kg de residuo). ec.16

Producción de biogás = 180 kg/día * 0.05 m³/kg = 9 m³/día

En promedio, la generación de biogás en el biodigestor será de 9 m³ con los 180 kg de estiércol en la relación 1:3 de estiércol y agua

Al aplicar los sólidos volátiles que son el 70 % que es la parte realmente aprovechable. El cálculo resultaría de la siguiente manera.

Producción ajustada de biogás = 9 m³/día * 0.70 = 6.3 m³/día ec.17

Denotando que la producción de biogás real esperada sería de 6.3 m³/día

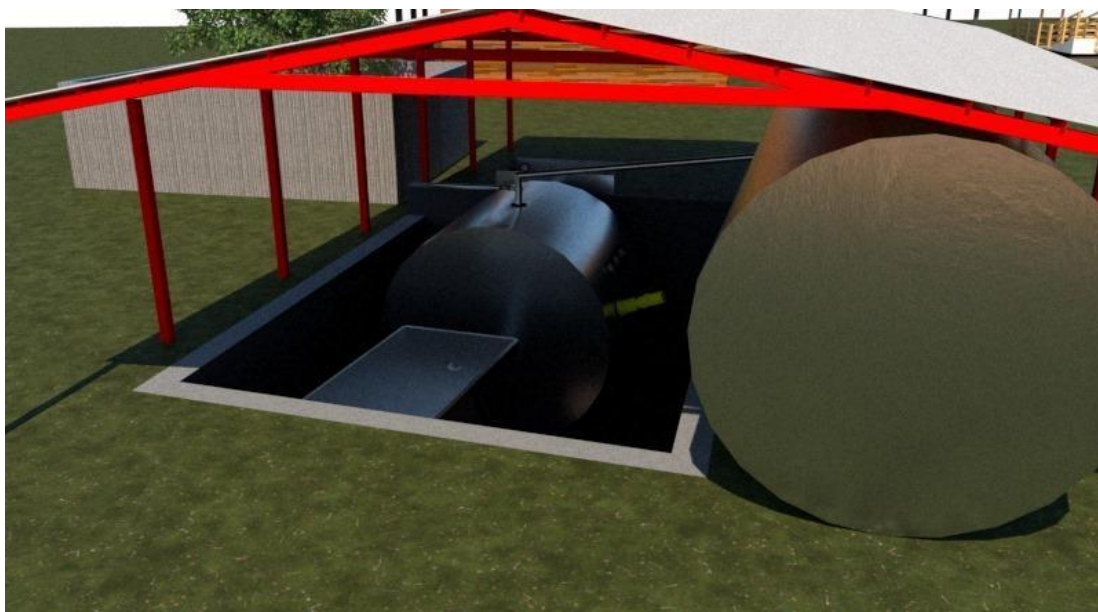
Teniendo en cuenta la producción de biogás real diaria podemos calcular la generación de biogás mensual

Producción de biogás real mensual = 6.3 m³/día * 24 días = 151.2 m³/mes ec.18

11.3.9. Reactor Seleccionado

Se presenta el biodigestor seleccionado acorde al dimensionamiento realizado con base en la cantidad de sustrato disponible. El modelo corresponde a un diseño tipo tubular, adecuado para las condiciones del sitio y el volumen útil requerido.

Figura 15. Biodigestor seleccionado acorde al dimensionado



11.3.10. Diseño el sistema de mezcla o agitación del biodigestor

Se instalarán sistemas de agitación que prevengan la sedimentación y acumulación de sólidos, el taponamiento de tuberías, así como para garantizar perfiles de temperatura constantes dentro del biodigestor, y una eficiente interacción entre microorganismos y el sustrato.

Para el cálculo del agitador aplicamos las siguientes formulas donde tendremos en cuenta el estiércol diario, solidos volátiles y solidos totales

Datos

Estiércol caprino = 45.35 kg/dia

Solidos volátiles = 70 %

Cálculos de solidos volátiles

$$\text{SV del Estiércol} = 45.35 \text{ kg} * 0.70 = 31.7 \text{ kg} \quad \text{ec.19}$$

Diámetro del Agitador

Generalmente, el diámetro del agitador debe ser proporcional al diámetro del biodigestor. Se recomienda que el diámetro del agitador sea entre 1/3 y 1/2 del diámetro del biodigestor.

El biodigestor tiene un diámetro de 1.60 m, el diámetro del agitador debe de ser:

$$\text{Mínimo: } \frac{1.60 \text{ m}}{3} = 0.53 \text{ m} \quad \text{ec.20}$$

$$\text{Máximo: } \frac{1.60 \text{ m}}{2} = 0.80 \text{ m} \quad \text{ec.21}$$

Altura del Agitador

La altura del agitador se establece entre el 50 % y el 75 % de la altura del biodigestor.

Si la altura del biodigestor es de 3 m, la altura del agitador será:

$$\text{Mínimo: } 0.5 \times 3 \text{ m} = 1.5 \text{ m}$$

$$\text{Máximo: } 0.75 \times 3 \text{ m} = 2.25 \text{ m}$$

Forma y Diseño de las Palas

La forma y el diseño de las palas del agitador son cruciales. Puedes optar por diferentes configuraciones:

- **Palas Rectas:** Adecuadas para una mezcla eficiente.
- **Palas en Forma de Hélice:** Mejores para mover líquidos viscosos.

Figura 16. Agitador para el biodigestor



GIANTMIX FR light

Agitador compacto para una gama flexible de aplicaciones

- Motor 4,0 / 7,5 kW
- Longitud de tubo 1,0 / 1,5 m
- Ø hélice von 520 - 700 mm

11.3.11. Sistema de recolección de biogás

Calcular un sistema de recolección de biogás implica varios pasos para garantizar que sea eficiente y adecuado a las características de tu biodigestor.

Estimación de la Producción de Biogás

Primero, necesitas estimar cuánto biogás se generará. Esto depende del tipo de sustrato, Los SV y las condiciones operativas.

Fórmula

Producción de biogás = Cantidad de residuos combinados con agua (kg/día) * Producción específica de biogás (m³/kg de residuo). *ec.22*

Producción de biogás = 180 kg/día * 0.05 m³/kg = 9 m³/día

Producción ajustada de biogás = 9 m³/día * 0.70 = 6.3 m³/día

Diseño del Sistema de Recolección

El sistema de recolección debe incluir los siguientes componentes:

Tuberías: Deben ser lo suficientemente grandes para manejar el volumen de biogás generado. Un diámetro común es de 50 a 100 mm,

Tanque de Acumulación: Puede ser necesario para almacenar el biogás antes de su uso. Este tanque debe estar a presión negativa o ser un sistema de membrana que se expanda.

Condensación y Filtrado: Incluye un sistema para condensar el agua y filtrar impurezas del biogás. Esto es importante para proteger los motores o calderas que usarán el biogás.

11.3.12. Cálculo de la Capacidad del Tanque de Acumulación

La capacidad del tanque dependerá de la producción de biogás

Capacidad Requerida:

Capacidad = Producción diaria de biogás × Días de almacenamiento

Capacidad = 6.3 m³/día * 4 días = 25.2 m³ serian 26 m³

volumen necesario del tanque de acumulación.

11.3.13. Cálculo la relación C/N de la mezcla

$$K = \frac{C1*Q1 + C2*Q2 + Cn*Qn}{N1*Q1 + N2*Q2 + Nn*Qn} \quad ec.23$$

Datos Proporcionados

- **Porcentaje de Carbono (C)** en el estiércol de cabra: 40% (0.40 en forma decimal)
- **Peso fresco (Q)** del estiércol de cabra: 45.35 kg
- **Porcentaje de Nitrógeno (N):** Para lograr una relación C

de 40:1, podemos calcular el N necesario.

Cálculo del Nitrógeno Necesario

Queremos que la relación C

sea 40:1, lo que significa que, por cada 40 kg de carbono, debe haber 1 kg de nitrógeno.

Cálculo del Carbono Total (K_C):

$$K_C = C \times Q = 0.40 \times 45.35 = 18.14 \text{ kg de carbono} \quad ec.23$$

Cálculo del Nitrógeno Total (K_N) necesario para lograr la relación 40:1:

$$K_N = \frac{K_C}{40} = \frac{18.14}{40} = 0.4535 \text{ kg de nitrógeno} \quad ec.24$$

Resumen de Resultados

- **Carbono Total (K_C):** 18.14 kg
- **Nitrógeno Total (K_N):** 0.4535 kg
- **Relación C / N:** $\frac{18.14}{0.4535} = 40:1$ *ec.25*

Para lograr una relación C/N de 40:1 utilizando estiércol de cabra con un 40% de carbono y 45.35 kg de peso fresco, necesitarías aproximadamente 0.4535 kg de nitrógeno en la mezcla.

Tabla 1. Relación Carbono nitrógeno en diferentes tipos de sustratos

Materiales	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1

(Bennardi, 2010)

11.3.14. Innovación en el sistema de biodigestión

De manera de aplicar nuevas tecnologías automáticas en los sistemas de biodigestores se implementará sistemas de análisis de temperatura, humedad y PH a base de Arduino con el fin de automatizar procesos e implementar nuevas tecnologías en esta área de estudio.

11.3.14.1. Sistema de análisis de temperatura y humedad con Arduino

Se plasmó un sistema a base de Arduino que monitoreara la temperatura del biodigestor acorde a su funcionamiento idóneo el cual va de 30° a 40° de temperatura.

Planificación del Proyecto

Antes de comenzar, define el objetivo: medir y visualizar la temperatura y la humedad dentro del biodigestor para optimizar su funcionamiento. Decide el lugar donde colocarás el sensor para que esté expuesto a las condiciones internas del biodigestor.

Figura 17. Código para el sensor de humedad y temperatura

```
sketch_nov18b
//Libraries
#include <DHT.h>
//I2C LCD:
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and 2 line display

//Constants
#define DHTPIN A3 // what pin we're connected to
#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Initialize DHT sensor for normal 16mhz Arduino

//Variables
int chk;
int h; // Stores humidity value
int t; // Stores temperature value

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Temperature and Humidity Sensor Test");
  dht.begin();
  lcd.init(); // Initialize the lcd
  lcd.backlight(); // Open the backlight
}

void loop()
{
  // Read data and store it to variables (humidity and temperature)
  // Reading temperature or humidity takes about 250 milliseconds
  h = dht.readHumidity();
  t = dht.readTemperature();

  // Lectura de valores
  h = dht.readHumidity();
  t = dht.readTemperature();

  // Mostrar en serial
  Serial.print("Humidity: ");
  Serial.print(h);
  Serial.print(" %, Temp: ");
  Serial.print(t);
  Serial.println(" Celsius");

  // Mostrar en LCD
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Simple Circuit ");

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("T:");
  lcd.print(t);
  lcd.print("C ");

  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print("H:");
  lcd.print(h);
  lcd.print("% ");

  delay(2000);
}
```

Materiales Necesarios

Arduino Uno (o compatible).

Sensor DHT11: Para medir temperatura y humedad.

Display LCD 16x2 con I2C: Para mostrar las lecturas.

Cables de conexión: Para las conexiones eléctricas.

Protoboard (opcional): Para facilitar el montaje.

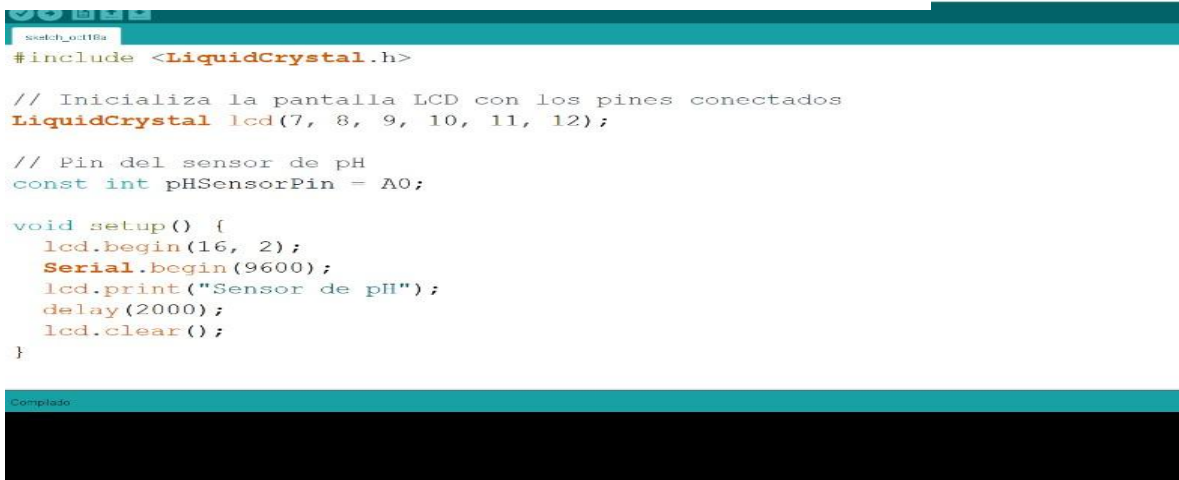
Fuente de alimentación: Puede ser una batería o una fuente USB

Con este sistema, se podrá monitorizar eficazmente la temperatura y humedad de tu biodigestor, lo que te permitirá hacer ajustes para optimizar el proceso de digestión anaerobia

11.3.14.2. Sistema de análisis de PH mediante el uso de Arduino

La implementación de un sistema de análisis de pH mediante Arduino es de gran importancia en diversos campos, como la agricultura, la acuicultura y el tratamiento de aguas, ya que permite monitorear de manera precisa y en tiempo real la acidez o alcalinidad de un medio.

Figura 18. Código para el sensor de pH



```
sketch_00116x
#include <LiquidCrystal.h>

// Inicializa la pantalla LCD con los pines conectados
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);

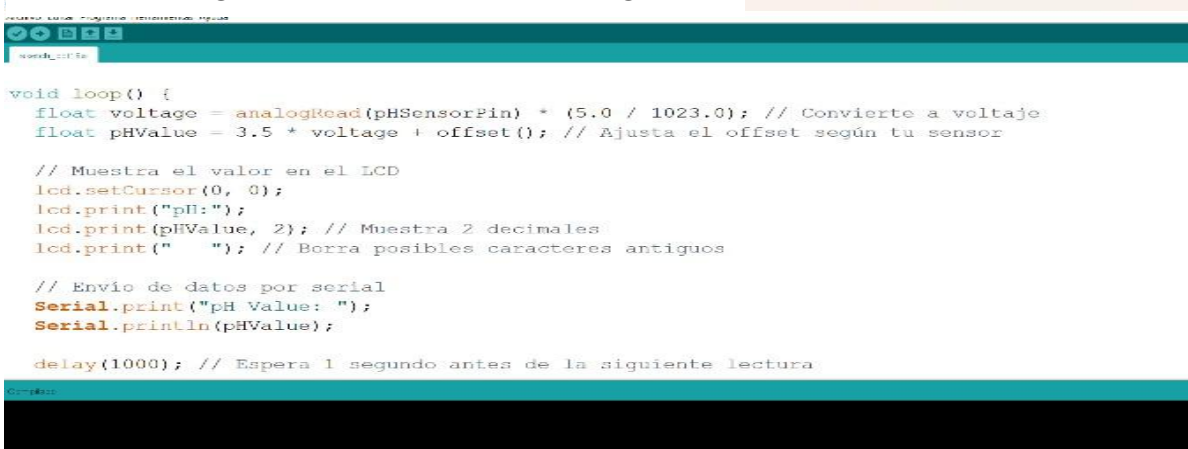
// Pin del sensor de pH
const int pHSensorPin = A0;

void setup() {
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.begin(9600);
  lcd.print("Sensor de pH");
  delay(2000);
  lcd.clear();
}

Compiado
```

Este tipo de sistema proporciona datos esenciales para optimizar condiciones de cultivo, garantizar la salud de los ecosistemas acuáticos y asegurar la calidad del agua.

Figura 19. Continuación del código



```
sketch_00116x
void loop() {
  float voltage = analogRead(pHSensorPin) * (5.0 / 1023.0); // Convierte a voltaje
  float pHValue = 3.5 * voltage + offset(); // Ajusta el offset según tu sensor

  // Muestra el valor en el LCD
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("pH:");
  lcd.print(pHValue, 2); // Muestra 2 decimales
  lcd.print(" "); // Borra posibles caracteres antiguos

  // Envío de datos por serial
  Serial.print("pH Value: ");
  Serial.println(pHValue);

  delay(1000); // Espera 1 segundo antes de la siguiente lectura.

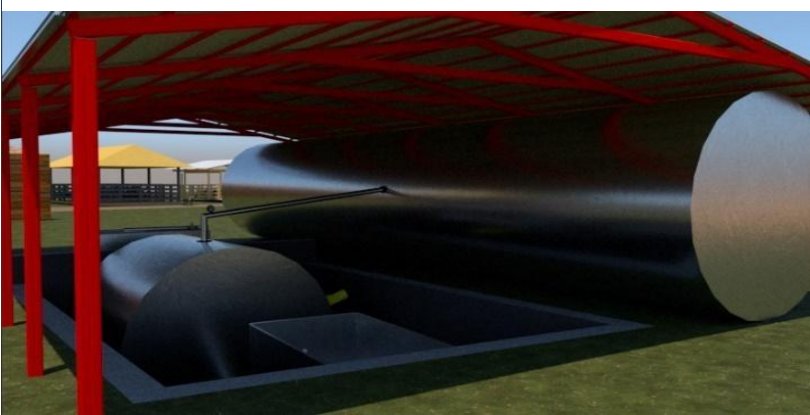
Compiado
```

Al utilizar Arduino, se facilita el acceso a tecnologías de medición que son económicas y fáciles de programar, lo que democratiza el uso de herramientas de análisis químico, promoviendo prácticas sostenibles en el manejo de recursos naturales.

11.3.15. Regulador de presión

Dentro del diseño del sistema de aprovechamiento del biogás, el regulador de presión cumple una función estratégica al permitir la conducción segura y estable del gas hacia los puntos de consumo. Su incorporación responde a la necesidad de controlar las variaciones de presión generadas durante el proceso de digestión anaerobia, asegurando compatibilidad con los equipos conectados y continuidad en el suministro. La selección del modelo se fundamenta en el caudal horario estimado, como parte del dimensionamiento integral del sistema.

Figura 21. Regulador de presión en el biodigestor



Selección del regulador de presión de gas natural presentada por Serna (2017). Para la selección del regulador de presión se tiene que tener en cuenta cuanto es la producción de gas que se tiene, para que posteriormente a esto dimensionar el regulador, al tener $6.3 \text{ m}^3 / 4$ horas uso de biogás podemos entender que nuestro gas m^3 que tenemos es de $1.57 \text{ m}^3/\text{h}$ y dentro de este margen se encuentra los reguladores de Etapa única diseñada para reducir la presión que se recibe del tanque o cilindro a la presión de trabajo de los aparatos de consumo, el regulador R 203 UE de 2.5 m^3 con un psi de entre 10-6

Figura 22. Regulador de presión seleccionado

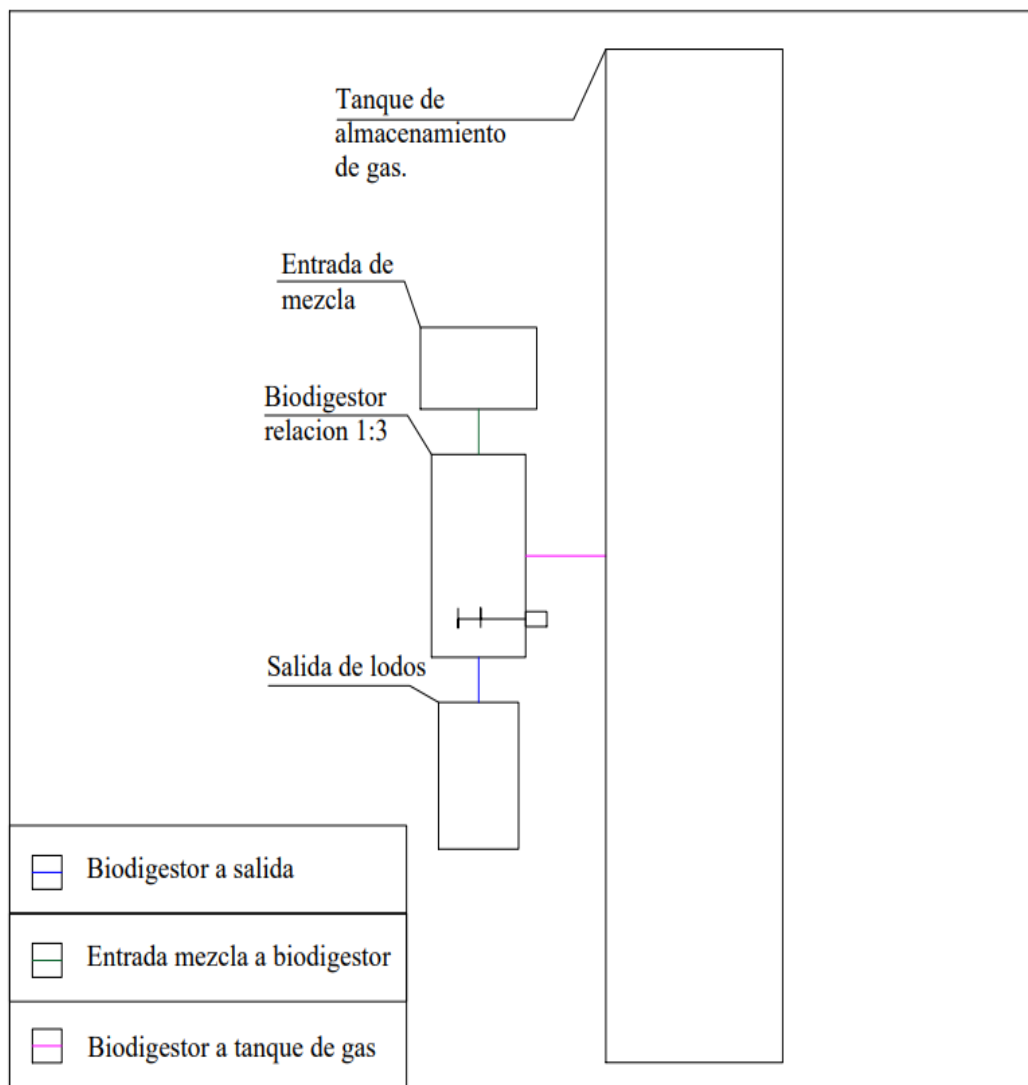


(Serna, 2017)

11.3.16. Diagrama de interconexión de tuberías

Se plasma la interconexión de tuberías en el biodigestor tubular seleccionado para la producción de biogás.

Figura 23. Interconexión de tuberías

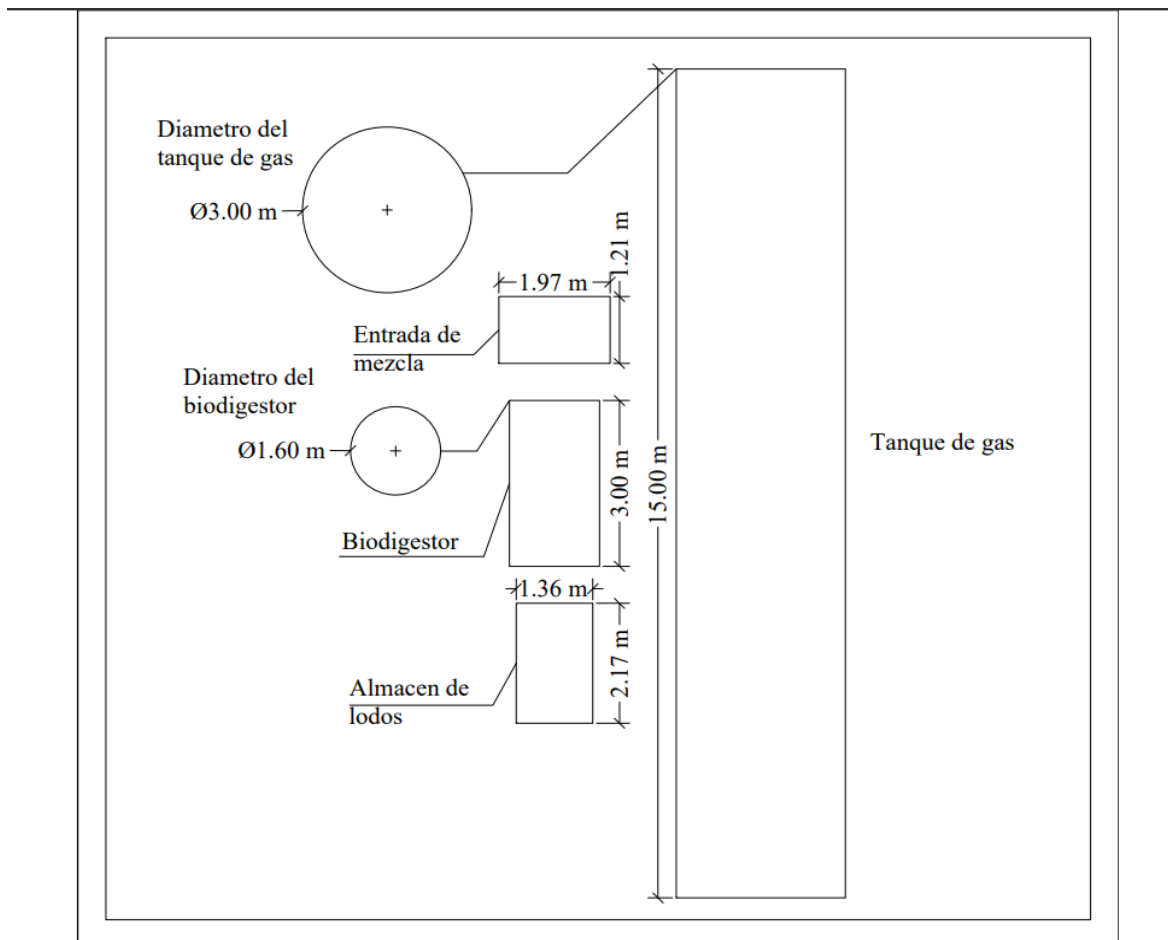


11.3.17. Esquema de interconexión de todo el sistema

Funcionamiento del biodigestor

El funcionamiento del biodigestor se basa en un diseño eficiente y gravitacional. La mezcla de entrada se introduce a 0.5 m sobre el nivel del suelo, lo que permite su desplazamiento natural hacia el interior del sistema. Una vez dentro, sensores de temperatura, pH y humedad monitorean las condiciones internas, facilitando el control del proceso anaeróbico y la producción de biogás. Tras la digestión, los lodos estabilizados se dirigen a la salida, donde son extraídos para su uso como fertilizante en cultivos u otras aplicaciones. Paralelamente, el biogás generado es conducido mediante tuberías hacia un sistema de almacenamiento equipado con válvulas de seguridad y medidores de presión, que regulan la operación y garantizan su correcto funcionamiento.

Figura 24. Sistema de interconexión



11.4. Determinación la viabilidad económica-financiera y ambiental de la propuesta energética.

Para valorar la viabilidad económica-financiera y ambiental de la propuesta energética, se presentan los resultados vinculados al costo de inversión del sistema de biodigestión, la sustitución proyectada del consumo de gas butano por biogás y la estimación de ahorros derivados de esa sustitución. El apartado integra los datos de consumo mensual de cilindros de 25 lb, su conversión a volumen energético y costos asociados, así como la producción teórica y ajustada de biogás en función de la disponibilidad real de excretas caprinas y los sólidos volátiles determinados, permitiendo contrastar cobertura y excedentes. Asimismo, se examinan los impactos ambientales mediante el análisis comparativo de emisiones de CO₂ entre el uso de gas convencional y el biogás producido localmente, destacando el aporte del ciclo biogénico en la mitigación de la huella de carbono. Con base en estos elementos, se establece un marco de evaluación que relaciona inversión inicial, generación de biogás, sustitución efectiva del gas comercial y beneficios económicos y ambientales esperados en el contexto operativo del Café Las Cabritas.

11.4.1. Diseño el sistema de Tratamiento de Lodos

La información presentada por Medina (2014) detalla el proceso para el tratamiento del biol generado por los biodigestores. Para tratar el biol, primero se recomienda filtrarlo para eliminar sólidos en suspensión, lo que mejora su calidad. Los métodos de filtración pueden incluir mallas finas o sistemas de tamizado. También es importante estabilizar el biol para reducir patógenos y mejorar la disponibilidad de nutrientes. Esto se puede lograr mediante pasteurización, que consiste en calentar el biol a temperaturas entre 60 y 70 grados Celsius, o mediante una fermentación controlada que favorezca microorganismos beneficiosos.

El almacenamiento debe realizarse en tanques oscuros y sellados para evitar la pérdida de nutrientes. Cuando se aplica, se sugiere diluir el biol en una proporción de 1:10 a 1:20 con agua, dependiendo de la sensibilidad del cultivo. Los métodos de aplicación pueden incluir riego por goteo, que permite una entrega eficiente a las raíces, o pulverización foliar para suministrar nutrientes directamente a las hojas durante períodos críticos.

Figura 25. Tratamiento del biol



Finalmente, es crucial monitorear tanto el biol como los cultivos. Realizar análisis químicos permite evaluar la concentración de nutrientes y ajustar la dosis de biol según la respuesta de las plantas. Este enfoque integral maximiza el uso del biol como fertilizante sostenible.

11.4.2. Producción de CO₂ en relación al consumo actual y producción teórica

Al tener en cuenta que la producción teórica de CO₂ por m³ 35% a 45%, tomando en cuenta el valor máximo podemos ver que en el consumo actual de gas es de 44.80 m³ podemos determinar que se producen 20.16 m³, ahora en base a nuestra producción de biogás de 151.20 m³ de los cuales 68.4 m³ se convertirán en CO₂.

En base a los cálculos obtenidos, la producción de una mayor proporción de gas genera una mayor producción de CO₂, aunque esto puede ser visto como una negativa, el tener una fuente alternativa de producción de biogás permite que este recurso se vuelva generación de energía renovable lo que resulta en una buena alternativa para los empresarios de esta índole que les permite aprovechar algo que generalmente se nota como desperdicio.

Tabla 15. Análisis de emisiones de CO₂ con los primeros cuatro meses del año

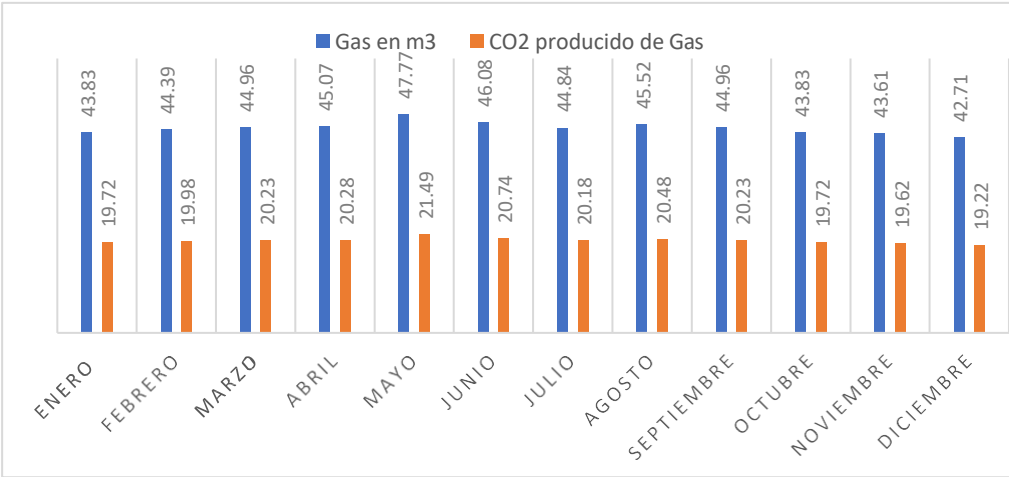
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Gas en m3	43.83	44.39	44.96	45.07
CO2 producido de Gas	19.72	19.98	20.23	20.28
biogás en m3	151.20	151.20	151.20	151.20
CO2 producido de biogás	68.04	68.04	68.04	68.04
biogás en m3 de ganancia	107.37	106.81	106.24	106.13
CO2 producido en ganancia	48.32	48.06	47.81	47.76

Tabla 16. Análisis de emisiones de CO₂ con los últimos ocho meses del año

Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
47.77	46.08	44.84	45.52	44.96	43.83	43.61	42.71
21.49	20.74	20.18	20.48	20.23	19.72	19.62	19.22
151.20	151.20	151.20	151.20	151.20	151.20	151.20	151.20
68.04	68.04	68.04	68.04	68.04	68.04	68.04	68.04
103.43	105.12	106.36	105.68	106.24	107.37	107.59	108.49
46.55	47.30	47.86	47.56	47.81	48.32	48.42	48.82

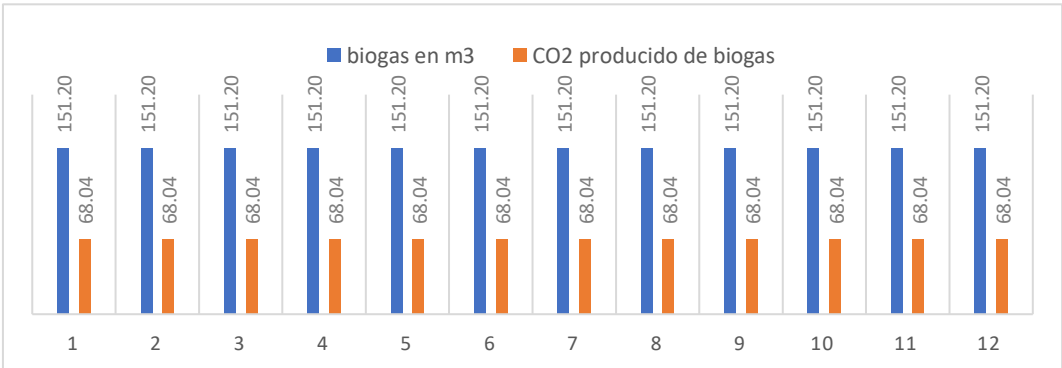
La figura 23, evidencia un consumo mensual constante de gas convencional (13.13 m³) y una emisión fija de CO₂ (9.72 kg), lo que refleja un patrón energético estable. Sin embargo, al tratarse de un combustible fósil, esta emisión representa una carga ambiental significativa, lo que justifica la búsqueda de alternativas más sostenibles que mantengan la eficiencia térmica sin aumentar la huella de carbono.

Figura 26. Producción de CO₂ por Gas



presenta la producción mensual de CO₂ derivada del uso de biogás, manteniendo los mismos valores de consumo energético (13.13 m³) y emisiones (9.72 kg) que el gas convencional. Aunque las cifras son equivalentes en términos cuantitativos, el biogás posee una ventaja ambiental sustancial: el CO₂ emitido proviene de un ciclo biológico cerrado, lo que implica que no se incrementa la concentración neta de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Este aspecto convierte al biogás en una fuente energética renovable y sostenible, capaz de satisfacer las necesidades térmicas del establecimiento sin generar impactos negativos acumulativos sobre el medio ambiente.

figura 27. Producción de CO₂ por biogás



11.4.3. Viabilidad del proyecto

Teniendo en cuenta que el costo inicial evaluado para la implementación del sistema de biodigestión es de C\$ 46,020.45 córdobas, el proyecto se mantiene dentro del rango medio de inversión para biodigestores comunitarios. Este valor resulta accesible en relación con los beneficios energéticos y económicos proyectados.

El consumo promedio mensual de gas butano en el Café Las Cabritas equivale a 9.96 tanques de 25 lb, lo que representa un gasto mensual de aproximadamente C\$ 5,480.52 córdobas y un gasto anual acumulado de C\$ 65,766.25 córdobas. En contraste, el sistema de biodigestión tiene una producción mensual estimada de 151.2 m³ de biogás, equivalente a 23.67 tanques de 25 lb, lo que permite satisfacer completamente la demanda energética del local y generar excedentes comercializables.

La venta de los tanques excedentes de biogás representa una ganancia mensual promedio entre C\$ 12,654.39 y C\$ 13,273.14, lo que permite recuperar la inversión inicial en menos de 3.6 meses. A lo largo de un año, el sistema genera una ganancia neta acumulada de C\$ 283,717.12 córdobas, lo que confirma la rentabilidad del proyecto desde una perspectiva financiera.

Análisis del aprovechamiento energético del biogás frente al consumo de gas butano

A partir del registro mensual de consumo de gas butano por parte de la comunidad estudiada, se realizó una estimación comparativa entre el costo actual del gas comercial y el beneficio potencial derivado del uso de biogás generado localmente.

El consumo anual de gas butano asciende a C\$ 65,766.25 córdobas, con una demanda energética equivalente a 120 tanques de 25 lb.

La producción anual del sistema de biodigestión supera los 1,800 m³ de biogás, lo que equivale a 284 tanques de 25 lb, permitiendo una cobertura energética del 100% y un excedente de más de 160 tanques.

Este excedente puede ser comercializado, generando ingresos adicionales que transforman el sistema en una fuente de ganancia energética y económica.

Datos de consumo y conversión

Se documentó el número de personas por mes y el consumo total de gas butano en libras (lb), equivalente a tanques de 25 lb.

Para facilitar la comparación con el biogás, se aplicaron conversiones a kilogramos (kg) y metros cúbicos (m³), considerando la densidad energética del butano.

El costo mensual del gas se calculó en base al precio unitario por tanque, sumando un total anual de C\$ 64,020.45.

Parámetros de generación de biogás

- **Producción mensual promedio de biogás:** 151.2 m³
- **Equivalencia energética estimada:** 1 m³ ≈ 0.88 lb de butano
- **Tanques equivalentes por mes:** 23.67 tanques de 25 lb
- **Precio unitario por tanque:** C\$ 550.00
- **Ganancia mensual estimada por venta:** C\$ 13,000 ± 300
- **Ganancia anual estimada:** C\$ 283,717.12

Comparación económica

a evaluación financiera actualizada del sistema de biodigestión evidencia una alta rentabilidad desde una perspectiva privada y comunitaria. Con una inversión inicial de C\$ 46,020.45, el sistema genera una ganancia anual estimada de C\$ 283,717.12, lo que permite recuperar el capital en menos de cuatro meses.

Los indicadores financieros aplicados refuerzan esta viabilidad:

Valor Actual Neto (VAN): C\$ 58,528.10

Tasa Interna de Retorno (TIR): 42.5%

Tasa de descuento aplicada: 10%

Estos resultados confirman que el proyecto no solo es sostenible, sino también rentable, especialmente cuando se considera la venta de los excedentes de biogás generados

mensualmente. La producción energética supera el consumo registrado, lo que permite transformar el ahorro energético en ingresos económicos directos.

En conjunto, el sistema representa una solución energética autosuficiente, con beneficios tangibles en términos de reducción de costos, generación de ingresos y fortalecimiento de la autonomía comunitaria.

Tabla 17. Evaluación comparativa de escenarios de sustitución y comercialización de biogás

Indicador técnico-económico	Escenario 1: Sustitución energética	Escenario 2: Sustitución + comercialización
Demanda mensual promedio de gas butano	9.96 tanques (C\$ 5,480.52)	9.96 tanques (C\$ 5,480.52)
Producción mensual estimada de biogás	151.2 m ³ (23.67 tanques)	151.2 m ³ (23.67 tanques)
Excedente energético mensual disponible	13.7 tanques	13.7 tanques
Margen económico mensual proyectado	C\$ 12,654.39 – C\$ 13,273.14	C\$ 12,654.39 – C\$ 13,273.14
Beneficio económico anual estimado	C\$ 156,211.47	C\$ 283,717.12
Valor Actual Neto (VAN) con tasa del 10%	No aplica	C\$ 58,528.10
Tasa Interna de Retorno (TIR)	No aplica	42.5%
Tiempo estimado de recuperación de inversión	No aplica	Menor a 4 meses

Tabla 18. Comparativo mensual entre consumo de gas convencional, generación de biogás y beneficios económicos en el Café Las Cabritas

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Personas	390	395	400	401	425	410	399	405	400	390	388	380
Gas usado lb	243.75	246.875	250	250.625	265.625	256.25	249.375	253.125	250	243.75	242.5	237.5
Tanques de 25 lb	9.75	9.875	10	10.025	10.625	10.25	9.975	10.125	10	9.75	9.7	9.5
Kilogramos	110.54	111.96	113.38	113.66	120.46	116.21	113.10	114.80	113.38	110.54	109.98	107.71
Gas en m³	43.83	44.39	44.96	45.07	47.77	46.08	44.84	45.52	44.96	43.83	43.61	42.71
Costo	5362.5	5431.25	5500	5513.75	5843.75	5637.5	5486.25	5568.75	5500	5362.5	5335	5225
Gas por persona lb	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625
Gas por persona m³	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Generación mensual m³	151.2	Promedio de tanques de gas		9.96								
Generación mensual kg	381.33											
Generación mensual lb	840.82											
tanques obtenidos * mes	23.67											
Guanacia mensual	C\$ 13,017.62											
Ganancia Anual	C\$ 156,211.47											

Tabla 19. Costos mensuales de gas y ganancias netas por consumo en el año

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Costo de gas actual	5362.5	5431.25	5500	5513.75	5843.75	5637.5	5486.25	5568.75	5500	5362.5	5335	5225
Ganancia neta del consumo	13135.64	13066.89	12998.14	12984.39	12654.39	12860.64	13011.89	12929.39	12998.14	13135.64	13163.14	13273.14

Figura 28. Relacion costo actual a beneficio

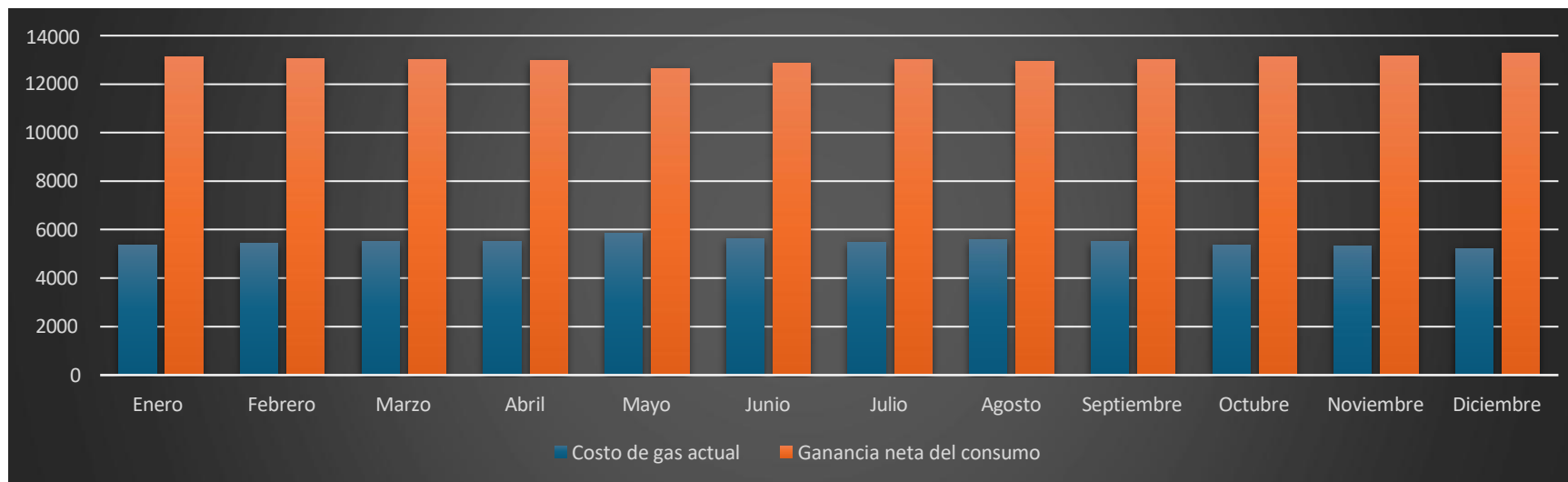


Tabla 20. Flujo de ingresos mensuales proyectados para evaluación financiera del sistema de biodigestión

Total de inversión	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
-C\$ 46,020.45	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62	C\$ 13,017.62

El flujo de ingresos mensuales proyectados para el sistema de biodigestión refleja una ganancia constante de C\$ 13,017.62, resultado de la sustitución del gas butano y la comercialización de excedentes de biogás. Este comportamiento financiero sostenido permite recuperar la inversión inicial de C\$ 46,020.45 en un periodo inferior a cuatro meses, lo que evidencia un retorno rápido y defendible para proyectos de escala comunitaria. La regularidad de los ingresos constituye un elemento clave para garantizar estabilidad en los flujos de caja y sustentar la evaluación financiera del proyecto.

A partir de estos valores se calcularon los indicadores financieros aplicados, obteniéndose un Valor Actual Neto (VAN) positivo de C\$ 58,528.10 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 42.5%, bajo una tasa de descuento del 10%. Estos resultados confirman la rentabilidad del sistema, validando su implementación como una alternativa energética autosuficiente y sostenible. Además de los beneficios económicos directos, el biodigestor contribuye a la reducción de costos operativos, la diversificación de ingresos y el fortalecimiento de la autonomía comunitaria, consolidando su viabilidad integral.

11.4.4. Evaluación financiera del sistema de biodigestión

Con el propósito de valorar la viabilidad económica del sistema de biodigestión propuesto, se aplicaron indicadores financieros convencionales que permiten estimar el retorno de la inversión desde una perspectiva comunitaria y productiva. El análisis se fundamenta en el presupuesto detallado del sistema, el aprovechamiento energético proyectado y el comportamiento mensual del consumo de gas butano en el Café Las Cabritas.

Presupuesto de inversión inicial

La inversión total estimada para la implementación del sistema asciende a C\$ 46,020.45, incluyendo materiales como láminas metálicas, tuberías, sistemas de medición y control, así como la contratación de mano de obra especializada (soldadores, ayudantes y transporte). Este monto corresponde a una inversión única necesaria para la puesta en marcha del sistema.

Indicadores financieros aplicados

Para evaluar la rentabilidad del sistema, se utilizaron los siguientes indicadores:

Tasa de descuento (TASA): 10% Se empleó una tasa del 10% como referencia para el análisis de inversión, considerando el costo de oportunidad del capital en contextos comunitarios y la necesidad de recuperar la inversión en un plazo razonable.

Valor Actual Neto (VAN): C\$ 58,528.10 El VAN positivo indica que, bajo los supuestos financieros considerados, el sistema recupera la inversión inicial y genera valor económico neto, lo que valida su rentabilidad desde una lógica financiera.

Tasa Interna de Retorno (TIR): 42.5% La TIR supera ampliamente la tasa mínima esperada, evidenciando que el rendimiento del sistema es financieramente atractivo. Este resultado se atribuye a la comercialización de los excedentes de biogás, que transforma el ahorro energético en ingresos monetarios directos.

Tiempo estimado de recuperación de inversión: Según los flujos mensuales proyectados, el sistema recupera la inversión en menos de 4 meses, lo que refuerza su viabilidad operativa.

Ahorro energético y beneficio económico

El sistema de biodigestión propuesto evidencia una alta eficiencia económica y energética, consolidándose como una alternativa viable frente al uso de gas butano comercial. El gasto total anual actual en gas butano asciende a C\$ 65,766.25, según el consumo mensual registrado en el establecimiento. En contraste, la producción mensual promedio de biogás alcanza los 151.2 m³, equivalentes a 23.67 tanques de 25 lb, volumen que supera ampliamente la demanda energética interna y permite la generación de excedentes con potencial de comercialización.

Este excedente energético se traduce en un beneficio económico directo, con una ganancia neta mensual proyectada entre C\$ 12,654.39 y C\$ 13,273.14, lo que representa una ganancia anual acumulada de C\$ 283,717.12. Dichos valores fueron utilizados como base para la evaluación financiera del sistema, obteniéndose indicadores positivos que confirman su rentabilidad:

Tasa de descuento (TASA): 10%

Valor Actual Neto (VAN): C\$ 58,528.10

Tasa Interna de Retorno (TIR): 42.5%

Periodo de recuperación de inversión: menor a 4 meses

Interpretación integral

La combinación de ahorro energético, generación de excedentes y retorno financiero posiciona al sistema de biodigestión como una solución autosuficiente y sostenible, capaz de reducir costos operativos, diversificar ingresos y fortalecer la autonomía energética comunitaria. Además, su implementación contribuye a la resiliencia social y ambiental, al disminuir la dependencia de combustibles fósiles y promover un modelo replicable en contextos rurales y semiurbanos. En consecuencia, el proyecto se valida como económicamente rentable, socialmente beneficioso y ambientalmente responsable, consolidando su viabilidad integral.

Tabla 21. Evaluación financiera

Evaluación financiera: TASA, VAN, TIR, gasto y beneficio anual	
TASA	10%
VAN	C\$ 58,528.10
TIR	42.5%
Gasto total anual actual	65766.25
Ganancia anual	221977.72

12. Conclusiones

El presente trabajo de investigación tuvo como propósito diseñar un sistema de biodigestión anaerobia para el aprovechamiento de excretas caprinas y la cobertura de la demanda energética del Café Las Cabritas en Estelí durante el año 2025. Para ello se desarrollaron distintos ejes de análisis que permitieron caracterizar la demanda energética, evaluar la disponibilidad de sustrato, dimensionar el biodigestor y valorar la viabilidad integral de la propuesta.

En primer lugar, se identificó que el Café Las Cabritas depende de un consumo mensual aproximado de diez cilindros de gas butano de 25 libras, lo que representa un gasto elevado y una vulnerabilidad frente al aumento de precios y dificultades de transporte. Esta caracterización permitió definir con precisión la magnitud de la demanda térmica que el biodigestor debe cubrir.

Por otra parte, el análisis de las excretas caprinas evidenció que el volumen y la frecuencia de generación son suficientes para garantizar un suministro constante de sustrato. La composición mostró condiciones adecuadas para la digestión anaerobia, confirmando su potencial metanogénico y su viabilidad técnica como materia prima para la producción de biogás y biofertilizante.

En cuanto al diseño técnico, los cálculos realizados permitieron establecer el volumen útil, la capacidad de carga y las dimensiones críticas del biodigestor. Las pruebas experimentales en biodigestores tipo batch, bajo condiciones mesofílicas (27–31 °C) y con valores de pH estables (6.7–7.0), demostraron una producción constante de biogás y un biofertilizante de calidad, validando que el sistema propuesto puede cubrir la demanda energética del establecimiento.

Finalmente, el análisis económico-financiero mostró que la inversión inicial puede recuperarse en un plazo razonable, generando ahorros significativos frente al gasto actual en combustibles fósiles. Desde el punto de vista ambiental, el sistema contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la gestión responsable de residuos. En el plano social, fortalece la autosuficiencia energética del Café Las Cabritas y constituye un modelo replicable en otros emprendimientos rurales.

En términos generales, los hallazgos confirman que el estudio cumplió con lo planteado, integrando caracterización energética, disponibilidad de sustrato, diseño técnico y viabilidad integral del sistema. No obstante, se reconocen limitaciones como la escala experimental reducida de los biodigestores tipo batch, lo que implica que los resultados deben extrapolarse con cautela a sistemas de mayor tamaño. Asimismo, factores externos como variaciones climáticas o cambios en la disponibilidad de sustrato podrían afectar el rendimiento real. Por ello, se recomienda que futuras investigaciones profundicen en el monitoreo a largo plazo, la incorporación de sistemas automatizados de control de temperatura y pH, y la evaluación de co-digestiones con otros residuos orgánicos para optimizar la producción de biogás.

El proceso de investigación representó una experiencia formativa valiosa, al integrar conocimientos técnicos, metodológicos y sociales en una propuesta concreta de innovación energética. La tesis reafirma la importancia de la biodigestión anaerobia como alternativa viable y sostenible para comunidades rurales, destacando su capacidad de transformar un problema ambiental en una solución energética y productiva. Con ello, se aporta un modelo replicable que fortalece la transición hacia energías renovables y la gestión responsable de los recursos en Nicaragua, consolidando el valor académico y social de este trabajo.

13. Recomendaciones

Para el Café Las Cabritas

Implementar el sistema de biodigestión anaerobia diseñado, asegurando la capacitación del personal en operación y mantenimiento.

Establecer un plan de monitoreo continuo de parámetros críticos como temperatura, pH y carga orgánica, con el fin de garantizar la estabilidad del proceso y maximizar la producción de biogás.

Utilizar el biofertilizante generado como insumo agropecuario, integrándolo en las prácticas agrícolas del establecimiento para mejorar la productividad y cerrar el ciclo de aprovechamiento de residuos.

Para la comunidad local

Promover la adopción de biodigestores en otros emprendimientos rurales, como pequeños restaurantes, fincas y cooperativas, para reducir costos energéticos y fomentar la autosuficiencia.

Incentivar la organización comunitaria para la gestión conjunta de biodigestores, lo que permitiría compartir recursos, conocimientos y beneficios ambientales.

Difundir los resultados del proyecto como ejemplo de innovación rural, fortaleciendo la conciencia ambiental y el uso responsable de los recursos disponibles.

Para instituciones académicas y de investigación

Incorporar este caso como referencia práctica en programas de formación en energías renovables, ingeniería ambiental y desarrollo rural sostenible.

Fomentar investigaciones complementarias que evalúen la co-digestión de excretas caprinas con otros residuos orgánicos, con el fin de optimizar la producción de biogás.

Desarrollar proyectos piloto a mayor escala que permitan validar la viabilidad técnica y económica en diferentes contextos rurales del país.

Para estudiantes y futuros profesionales

Tomar esta experiencia como modelo metodológico para el diseño de proyectos de innovación energética, integrando rigor técnico con pertinencia social.

Profundizar en el estudio de tecnologías limpias y su aplicación en comunidades rurales, fortaleciendo competencias profesionales en sostenibilidad y gestión de recursos.

Promover la cultura de investigación aplicada, orientada a resolver problemas reales de acceso energético y aprovechamiento de residuos.

14. Referencias Bibliográficas

- Amorim Orrico, A. C., Previdelli Orrico Junior, M. A., & Junior, J. (2011). *Biodigestão anaeróbia dos dejetos de cabritos Saanen alimentados com dietas com diferentes proporções volumoso e concentrado*.
file:///C:/Users/Legion/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/7LNG1061/segundo_antecedente[1].pdf
- Barros Gómez, Y. P., Dangond Rodríguez, Y. E., & Bastidas Barranco, M. (2017). *Aprovechamiento del estiércol caprino como recurso biomásico para la producción de biogás tomando como referencia a la comunidad Yutaho ubicado en Cuatro Vías, La Guajira*.
file:///C:/Users/Legion/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/U82P2YFS/cuarto_antecedente[1].pdf
- de Quadros, D., Oliver, A., Ueliton, R., Valladares, R., de Souza, P., & Ferreira, E. (2010). *Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível*.
file:///C:/Users/Legion/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/4ILP85EJ/tercer_antecedente[1].pdf
- Ahring, B. K., Sandberg, M., & Angelidaki, I. (1995). *Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digester*.
- Arellano, J., & Varnero, M. (1990). *Aprovechamiento racional de los desechos organicos*. Informe tecnico , Ministerio de agricultura , Facultad de ciencias agrarias y forestales , Santiago.
- Bennardi, D. O. (2010). *Digestión anaeróbica: obtención de biogás*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://www.argentina.gob.ar/inta>
- Biblioteca del Campo. (1998). *Importancia del agua, sistema de riego, recurso hidrico calidad de el agua*. Biología de eel suelo.
- Bidlingmaier, W. (2006). *probes anaerobic degestion Biocycle journal of composting and organics recyclin*.
- colegio villa flor . (2019). *colegiovillaflor.com*.
<https://colegiovillaflor.com/lesson/crecimiento-de-la-poblacion/>
- Family size bio- Gas plant- Code of practice . (1998). India: Berau of indian standars, New Delhi.

- Fannin, K. (1987). *start up, operation, stability, and control in aerobic digestion of biomass*. Retrieved 15 de agosto de 2020, from <https://www.elsevier.com/search-result?query=start%20up%2C%20operation%2C%20stability%2C%20and%20control%20in%20aerobic%20digestion%20of%20biomass&labels>
- Gallert, C., Bauer, S., & Winter, J. (1998). *Effect of ammonia on anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population*.
- Gobierno de Nicaragua. (2022). *Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022–2026. Ministerio de Hacienda y Crédito Público*. <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-nacional-de-lucha-contra-la-pobreza-y-para-el-desarrollo-humano-2022-2026-de-nicaragua>
- google Earth. (2024). *Ubicacion del area de estudio vista Aerea. Esteli, Nicaragua*. <https://earth.google.com/web/@13.0995515,-86.36851465,845.50622725a,82.71285584d,35y,0.90925105h,0t,0r>
- Guarda Puebla, Y. (2012). *Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del café. Universidad politécnica de Madrid escuela técnica superior de ingenieros*. Madrid.
- Hashimoto, A. G. (1986). *Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes. Agricultural Waster*.
- Hernandez Ruiz, M. j. (2 de diciembre de 2009). Retrieved 16 de octubre de 2015, from biodigestoresmjhr.blogspot.com/
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación (Sexta ed.)*. Mexico: McGraw Hill education. <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=ed69751a7a7a5ef5c6e50df9d939d01b1d0a46a86aa4a7098e1de02e71ec0e83JmltdHM9MTc2MDQ4NjQwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=242c00ba-db10-64fe-04ac-15fada7c6544&psq=link+de+metodolog%c3%ada+de+la+investigaci%c3%b3n+de+fern%c3%a1ndez+y+he>
- Hernandez, F. (2015). *BIOGAS: casos de éxito en el sector industrial*. Mexico.
- Hilbert, J. (2007). *Manual para la producción de biogás*. México DF: Castelar . .
- Hobson, p. N. (1995). *the treatment of agricultural wastes, en anaerobic digestion: a waste tratment techonology*.
- Hwu, C. H., & Lettinga, G. (1997). *Acute toxicity of oleate to acetate utilizing methamogens in mesophilic and temperature anaerobic sludge. Enzyme microbiology technolgt*.

- INE. (2022). <https://www.ine.gob.ni>. [https://www.ine.gob.ni/?p=114248](https://www.ine.gob.ni:https://www.ine.gob.ni/?p=114248)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 – Energy*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- International Energy Agency. (2023). *CO₂ Emissions in 2022*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- Krugel, I., Nemeth, L., & Peddie, C. (1998). *Extending thermophilic anaerobic digestion for producing class a biosolids at the greater vancouver regional district annacis island wastewater treatment plant*.
- Kumar, S. (2008). *Anaerobic reactor configurations for bioenergy production*. Blackwell Publishing. Hawai.: Principles and Applications.
- Lifeder. (2023). *Investigación transversal: concepto, características, diseño, tipos, ejemplos*. <https://www.lifeder.com/investigacion-transversal/>
- Madrid, Universidad Politécnica de. (2022). *Investigación experimental en tecnologías innovadoras para una comunidad energética eficiente y sostenible*. Portal Científico UPM. Madrid. <https://portalcientifico.upm.es/es/ipublic/item/9790041>
- Mae-Wan, H. (2008). *biogas bonanza for third world development*. <http://www.i.sis.org.uk/BiogasBonanza.php>
- Martinez, M. (2013). *MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Santiago.
- Martinez, T. (2014). *Ciudadania y justicia ambiental fundacion*. Retrieved 29 de octubre de 2016, from Ciudadania y justicia ambiental fundacion: www.mbigua.org.ar Paraná
- Medina , A. (2014). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE BIOL DE SEGUNDA GENERACIÓN DE ESTIÉRCOL DE OVINO PRODUCIDO A TRAVÉS DE BIODIGESTORES*. Lima. <https://doi.org/https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/772>
- Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Ramakrishna Dave, & Meyer, L. (2007). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University.
- Meza García, M. (2011). *Disturbios del estado ácido-básico en el paciente crítico*.

- Ministerio de Educación [MINED]. (2022). *Estrategia Nacional de Educación en todas sus modalidades “Bendiciones y Victorias” 2024–2026*. Gobierno de Nicaragua. <https://www.mined.gob.ni/estrategia-nacional-de-educacion-en-todas-sus-modalidades/>
- Ministerio de energía de Chile. (2011). *Manual de biogas*. Ciencias e investigación . Santiago Chile: Proyecto CHI/00/G32 .
- Organización de Estados Iberoamericanos. (2013). *La investigación y el desarrollo en energías renovables*. RICYT. https://www.ricyt.org/wp-content/uploads/2013/03/files_2_1_La_investigacion_y_el_desarrollo_en_energias_renovables
- Orozco Hernández, E., Torrez Rivera, H., & López Herrera , J. (2022). *Evaluación del lactosuero, excretas de vacuno y caprino a través de la codigestión anaerobia no controlada para la generación de biogás en la empresa ASOPASN, en la comunidad La Garnacha, San Nicolás*. <https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/18087/>
- Osorio, J., Ciro, H., & Gonzalez, H. (2007). *Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío*.
- Sánchez Muñoz , M. (21 de 02 de 2015). <https://www.redalyc.org/>. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263139243060.pdf>
- Serna , G. (2017). Gas Natural presión selección de regulador. *video de educación de física e ingeniería*. <https://www.youtube.com/watch?v=eTPRsVQF-uA>
- Sosa, J. J. (2015). *Modelación de digestión anaeróbica en biodigestores*. La paz, Bolivia. <http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?lng=pt>
- Speece, R. (1983). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment*. <https://doi.org/10.1021/es00115a725>
- Tamayo, M. (1997). *El proceso de la investigación científica*. Limusa. https://www.academia.edu/120612419/EL_PROCESO_DE_LA_INVESTIGACION_CIENTIFICA_5_Tamayo
- Torres, L. (2006). *Producción de biogas a nivel de laboratorio utilizando estiércol de cabra*. Guanajuato, Mexico. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41616204>
- Universidad de Barcelona. (2022). *La concepción empírico-analítica*. Barcelona. <https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/203866/5/FEIE2-Tema5-Apuntes.pdf>

Valdivia. (2000). Uso de Biogás para la generación de energía eléctrica mediante un motor gasolinero estacionario modificado. Lima, Perú. .

Valverde Calero, J. I. (2019). *Diseño e implementación de un biodigestor para la producción de biogás en una vivienda unifamiliar en el distrito de Chongos Bajo.*

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UAPI_6bb3673b095e9019d467003ad108a123/Description

Van Lier, J. B., Hulsbeek, J., Stams, A. J., & Lettinga, G. (1993). *temperature susceptibility of thermophilic methanogenic: implication for reactor start-up and operation.*

Wiley, J. (2008). *Environmental Factors. En: Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production:.* 63, California .

15. Anexos

Tabla 22. Presupuesto para sistema de biodigestor

Materiales	Días de uso	Unidades	Costo unitario	Costos totales
láminas de acero de 0.60 mm x4 ft x 8ft		6	C\$ 1,729.00	C\$ 10,374.00
SOLDADURA 7018 AC 1/8X14" HILCO		4	C\$ 151.58	C\$ 606.32
TUBO PVC AGUA POTABLE 6MTS 3 Pulgadas		2	C\$ 1,399.00	C\$ 2,798.00
TUBO PVC AGUA POTABLE 6MTS 2 Pulgadas		2	C\$ 889.00	C\$ 1,778.00
TUBO COBRE DHP Rig. S/COSTURA TD, T 6.10 Mts		1	C\$ 120.13	C\$ 120.13
Sistemas de Arduino		1	C\$ 1,832.00	C\$ 1,832.00
medidores de flujo de gas		1	C\$ 917.00	C\$ 917.00
Agitador		1	C\$ 12,845.00	C\$ 12,845.00
Trabajadores				C\$ -
Soldadores	6	2	C\$ 400.00	C\$ 4,800.00
Peones	8	4	C\$ 300.00	C\$ 9,600.00
Transporte	4	1	C\$ 350.00	C\$ 350.00
Total				-C\$ 46,020.45

Fases del proyecto

Figura 29. Responsables de la ejecución del proyecto

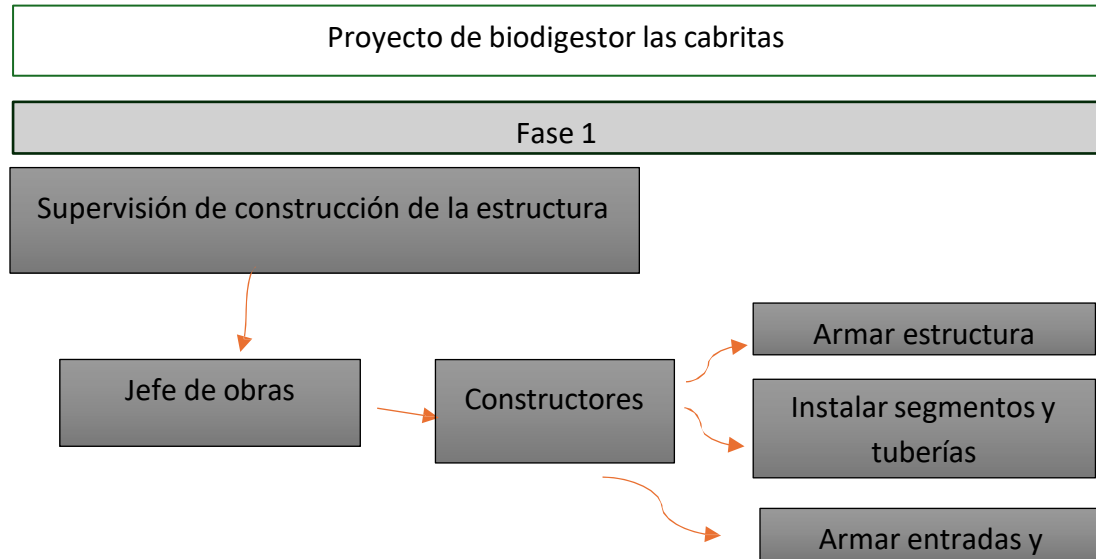


figura 30. Segunda fase de ejecución

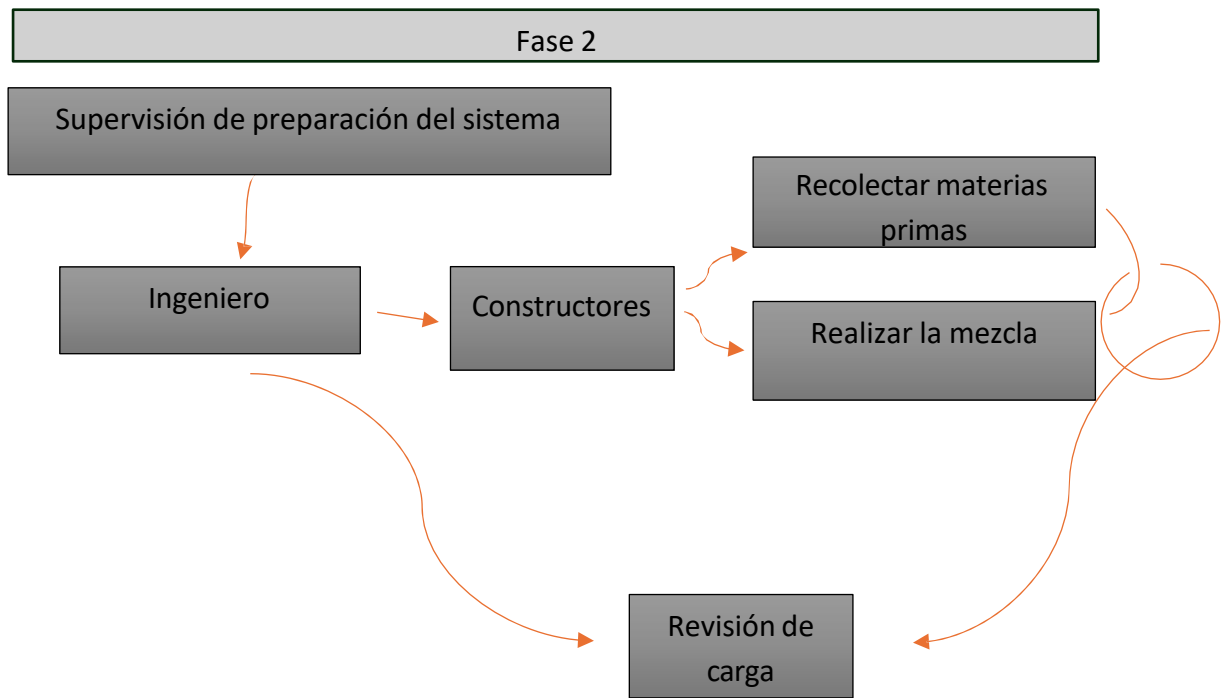
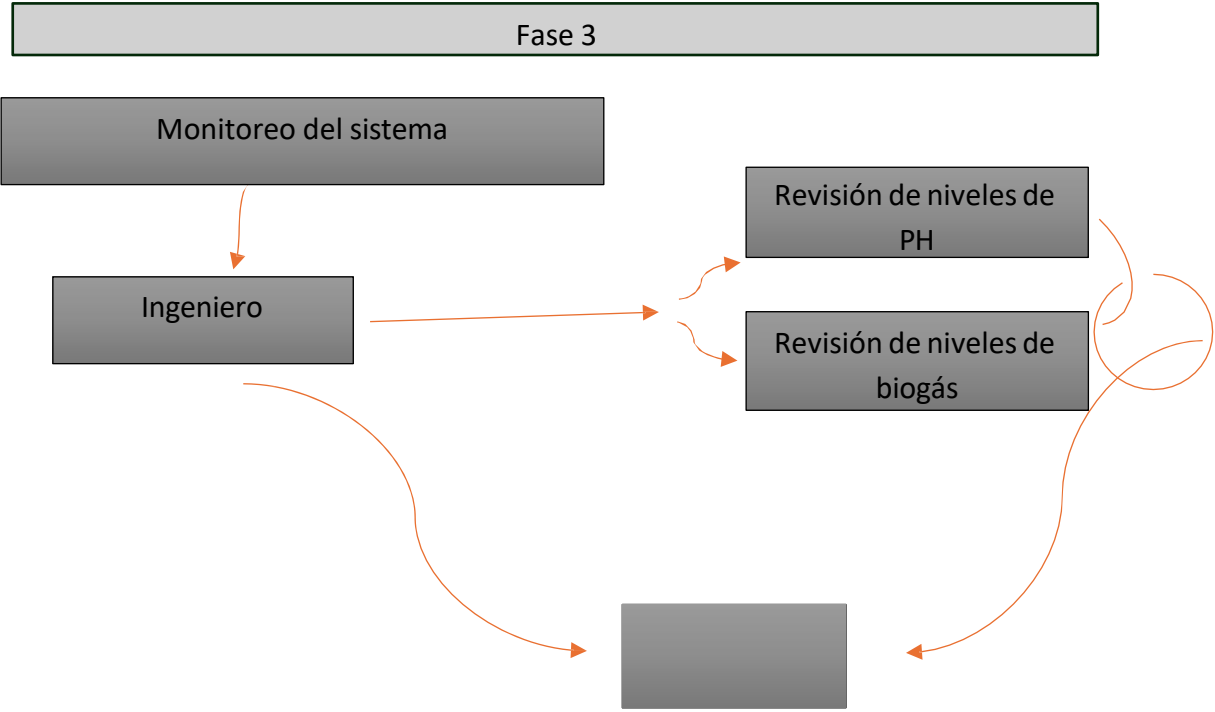
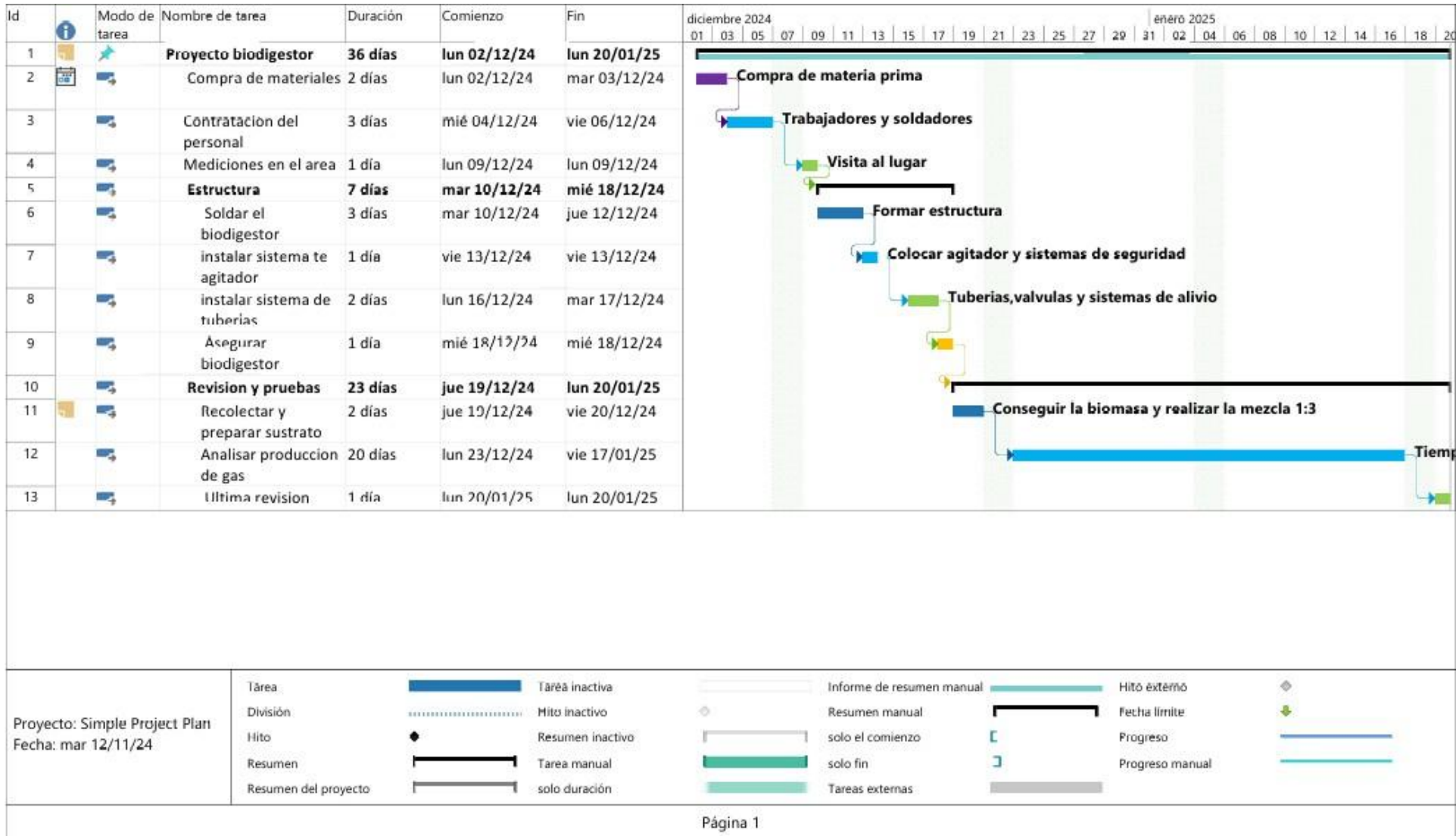


figura 31. Tercera fase de ejecución



Cronograma de actividades

figura 32. Cronograma de actividades.





Herramientas e instrumentos para la recolección de información

Encuesta estructurada sobre consumo energético de gas en el Café Las Cabritas

Información general del establecimiento

1. **¿Cuántos días a la semana se realizan actividades de cocción en el establecimiento?** 1–2 días 3–4 días 5–6 días Todos los días
2. **¿Cuántas horas promedio se utiliza el gas por jornada de trabajo?** Menos de 2 horas Entre 2 y 4 horas Entre 4 y 6 horas Más de 6 horas
3. **¿Cuántos cilindros de gas de 25 lb se consumen al mes?** 1 2 3 Más de 3 (especifique: _____)
4. **¿Con qué frecuencia se reponen los cilindros de gas?** Semanalmente Cada 15 días Mensualmente Según necesidad

II. Equipamiento y uso energético

5. **¿Cuántos equipos de cocción funcionan con gas en el establecimiento?** 1 2 3 Más de 3 (especifique: _____)
6. **Tipo de equipos que utilizan gas (puede marcar más de una opción):** Cocina de hornillas Plancha Horno Otro (especifique): _____
7. **¿Qué tipo de alimentos se cocinan regularmente?** Comidas típicas Panadería o repostería Bebidas calientes Otros (especifique): _____

III. Percepción y hábitos energéticos

8. **¿Considera que el consumo de gas es elevado?** Sí No No sabe / No responde
9. **¿Ha considerado el uso de una fuente alternativa de energía (como biogás)?** Sí No No lo conoce

10. **¿Qué factores considera que influyen más en el consumo de gas?** Cantidad de clientes atendidos Tipo de alimentos preparados Tiempo de cocción Otros (especifique): _____

Cuestionario cerrado sobre demanda energética de gas

I. Equipamiento energético

1. **¿Cuántos equipos de cocción funcionan con gas en el establecimiento?** 1 equipo 2 equipos 3 equipos Más de 3 equipos
2. **¿Qué tipo de cilindro de gas se utiliza regularmente?** 25 lb 100 lb Otro (especifique): _____
3. **¿Cuántos cilindros se consumen en promedio al mes?** 1 cilindro 2 cilindros 3 cilindros Más de 3 cilindros

II. Uso operativo del gas

4. **¿Cuántas horas promedio se utiliza el gas por jornada de trabajo?** Menos de 2 horas Entre 2 y 4 horas Entre 4 y 6 horas Más de 6 horas
5. **¿Con qué frecuencia se reponen los cilindros de gas?** Semanalmente Cada 15 días Mensualmente Según necesidad

III. Percepción del consumo energético

6. **¿Considera que el consumo de gas es elevado en relación con las actividades del café?** Sí No No sabe / No responde
7. **¿Ha notado variaciones en el consumo de gas según la cantidad de visitantes o temporada?** Sí No No lo ha observado
8. **¿Considera viable el uso de una fuente alternativa como el biogás para cubrir la demanda energética?** Sí No No conoce el biogás

Registrar el comportamiento energético del establecimiento en relación con el uso de gas para la cocción de alimentos.

Lugar de observación: Café Las Cabritas **Fecha:** _____ **Hora de inicio:** _____ **Hora de finalización:** _____ **Observador:** _____

I. Actividad operativa del día

1. **¿Se realizaron actividades de cocción durante la jornada?** Sí No
2. **Número total de servicios alimenticios ofrecidos en la jornada:** 1–10 11–20
 21–30 Más de 30
3. **Horario de inicio de cocción:** Antes de las 7:00 a.m. Entre 7:00 a.m. y 9:00 a.m. Después de las 9:00 a.m.
4. **Duración total de uso del gas en la jornada:** Menos de 2 horas Entre 2 y 4 horas Más de 4 horas

II. Equipos y tipo de cocción

5. **Cantidad de equipos de cocción en uso:** 1 2 3 Más de 3
6. **Tipo de equipos utilizados (marcar todos los que apliquen):** Cocina de hornillas
 Plancha Horno Otro (especifique): _____
7. **Tipo de alimentos preparados durante la jornada:** Comidas típicas Panadería o repostería Bebidas calientes Otros (especifique): _____

III. Comportamiento energético observado

8. **¿Se observó uso continuo del gas durante la jornada?** Sí No Intermitente
9. **¿Se realizaron pausas prolongadas entre sesiones de cocción?** Sí No

10. ¿Se utilizó más de un cilindro de gas durante la jornada? Sí No

11. **Observaciones adicionales sobre el uso energético (espacio libre):**

Entrevista semiestructurada al personal agropecuario

Objetivo: Validar información sobre la generación de excretas caprinas, prácticas de manejo y percepción del potencial energético del estiércol.

Nombre del entrevistado: _____ **Cargo o función:**

Fecha: _____ **Entrevistador:**

I. Generación de excretas caprinas

1. ¿Cuántos animales caprinos están en producción actualmente?
2. ¿Con qué frecuencia se realiza la limpieza del corral? Diaria Cada dos días
Semanal Otra (especifique): _____
3. ¿Cuánta cantidad aproximada de excretas se recolecta por jornada de limpieza?
Menos de 50 lb Entre 50 y 100 lb Más de 100 lb No se ha medido
4. ¿En qué horario se realiza normalmente la recolección de excretas? Mañana
Tarde Según necesidad Otro: _____

II. Prácticas de manejo del estiércol

5. ¿Qué se hace actualmente con las excretas recolectadas? Se desechan al aire libre
 Se utilizan como abono Se almacenan sin uso definido Otro (especifique):

6. ¿Existe algún sistema de almacenamiento o tratamiento del estiércol? Sí (describa
brevemente): _____ No
7. ¿Ha recibido alguna capacitación sobre el manejo adecuado de residuos caprinos?
Sí No

III. Percepción del potencial energético

8. ¿Conoce el proceso de biodigestión anaerobia? Sí No Lo ha escuchado, pero no lo domina
9. ¿Cree que el estiércol caprino podría aprovecharse para generar energía (biogás)? Sí No No está seguro
10. ¿Considera viable implementar un sistema de biodigestión en el establecimiento?
¿Por qué?
11. ¿Qué beneficios cree que traería el uso del biogás en el café?

Guía de observación del corral caprino

Objetivo: Registrar información operativa sobre la generación y manejo de excretas caprinas, así como las condiciones físicas del corral.

Lugar de observación: Café Las Cabritas **Fecha:** _____ **Hora de inicio:** _____ **Hora de finalización:** _____ **Observador:** _____

I. Caracterización del rebaño

1. **Número total de animales presentes en el corral:** 1–10 11–20 21–30 Más de 30
2. **Categoría predominante de los animales observados:** Cabras adultas Crías Mixto
3. **Estado general de los animales:** Buen estado corporal Regular Delgados o con signos de enfermedad

II. Generación y recolección de excretas

4. **Frecuencia observada de recolección de excretas:** Diaria Cada dos días Semanal Irregular
5. **Volumen aproximado recolectado por jornada (estimado visualmente):** Menos de 50 lb Entre 50 y 100 lb Más de 100 lb
6. **Método de recolección utilizado:** Manual con pala Herramienta mecánica Otro (especifique): _____
7. **Destino inmediato de las excretas recolectadas:** Se desechan al aire libre Se almacenan en un área específica Se utilizan como abono Otro (especifique): _____

III. Condiciones físicas del corral

8. **Tipo de piso del corral:** Tierra compactada Cemento Madera elevada Otro (especifique): _____
9. **Condiciones de limpieza del área al momento de la observación:** Limpio y seco Húmedo, pero sin acumulación Presencia de excretas acumuladas Mal olor o condiciones insalubres
10. **Presencia de infraestructura para manejo de residuos (canaletas, drenajes, áreas de compostaje):** Sí (describa): _____ No

IV. Observaciones adicionales

11. **Notas del observador:**

Formato de entrevista técnica al personal agropecuario

Objetivo: Recolectar información sobre el manejo operativo del estiércol caprino como sustrato energético potencial.

Nombre del entrevistado: _____ **Cargo o función:** _____
Fecha: _____ **Entrevistador:** _____

I. Prácticas de limpieza del corral

1. ¿Con qué frecuencia se realiza la limpieza del corral caprino? Diaria Cada dos días Semanal Irregular
2. ¿En qué horario se realiza normalmente la limpieza? Mañana Tarde Según necesidad
3. ¿Qué herramientas se utilizan para la recolección de excretas? Pala manual Herramienta mecánica Otro (especifique): _____
4. ¿Cuánto tiempo toma en promedio realizar la limpieza completa del corral? Menos de 30 minutos Entre 30 minutos y 1 hora Más de 1 hora

II. Frecuencia y volumen de generación

5. ¿Cuánta cantidad aproximada de excretas se recolecta por jornada? Menos de 50 lb Entre 50 y 100 lb Más de 100 lb No se ha medido
6. ¿Se ha observado variación en la cantidad de excretas según la época del año o alimentación? Sí No No lo ha notado
7. ¿Se lleva algún tipo de registro sobre la producción de estiércol? Sí No

III. Uso actual del estiércol

8. ¿Qué se hace actualmente con las excretas recolectadas? Se desechan al aire libre Se utilizan como abono Se almacenan sin uso definido Otro (especifique): _____
9. ¿Existe algún sistema de almacenamiento o tratamiento del estiércol? Sí (describa brevemente): _____ No
10. ¿Se ha intentado aprovechar el estiércol para algún uso energético o productivo? Sí No No se ha considerado

IV. Disposición final y percepción del potencial energético

11. ¿Conoce el proceso de biodigestión anaerobia? Sí No Lo ha escuchado, pero no lo domina
12. ¿Considera viable implementar un sistema de biodigestión en el establecimiento?
¿Por qué?
13. ¿Qué beneficios cree que traería el uso del biogás en el café? Reducción de costos energéticos Mejora ambiental Aprovechamiento de residuos Otro (especifique): _____

Ficha de registro de producción diaria de excretas caprinas

Objetivo: Documentar la cantidad de excretas generadas por jornada, la frecuencia de recolección semanal y el volumen acumulado mensual en el Café Las Cabritas.

Fecha de registro: _____ Nombre del responsable: _____
 Área de recolección: _____ Número de animales presentes: _____

I. Registro diario de producción

Tabla 23. Registro de producción de excremento caprino

Día de la semana	Hora de recolección	Volumen estimado recolectado (lb)	Condiciones del corral	Observaciones
Lunes				
Martes				
Miércoles				
Jueves				
Viernes				
Sábado				
Domingo				

II. Frecuencia semanal de recolección

1. ¿Cuántas jornadas de recolección se realizaron esta semana? 1 2 3 4
o más
2. ¿Se mantuvo una rutina constante de limpieza? Sí No Parcialmente
3. ¿Hubo variaciones en el volumen recolectado entre días? Sí No No se registró

III. Acumulación mensual estimada

Tabla 24. Acumulación mensual estimada de excremento caprino.

Semana del mes	Total, recolectado (lb)	Observaciones
Semana 1		
Semana 2		
Semana 3		
Semana 4		
Total, mensual		

IV. Observaciones generales

- **Condiciones climáticas que afectaron la recolección:**
- **Cambios en la alimentación o manejo que influyeron en la producción:**
- **Recomendaciones para mejorar el registro o la recolección:**



¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!



