



**Uleam**  
UNIVERSIDAD LAICA  
ELOY ALFARO DE MANABÍ

**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Y**  
**TECNOLOGÍAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DE**  
**TÍTULO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TEMA**

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EXCRETAS BOVINAS Y  
CAPRINAS CON BIODIGESTOR TIPO TAIWÁN PARA GENERAR BIOGÁS Y  
FERTILIZANTES EN LA FINCA LODANA.”

**AUTORAS**

ALCÍVAR MOREIRA GÉNESIS LISSETH  
YÉPEZ LOMBEIDA PAMELA GEOVANNA

**TUTOR**

ING. ÁNGEL PERÉZ BRAVO, MG.AG

**MANTA-MANABÍ-ECUADOR**

**2025-1**

## CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ciencias de la Vida y Tecnologías de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría de los estudiantes **Alcívar Moreira Génesis Lisseth y Yépez Lombeida Pamela Geovanna**, legalmente matriculados en la carrera de Ingeniería Ambiental, periodo académico 2024-2, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es **“Diseño de un sistema de tratamiento de excretas bovinas y caprinas con biodigestor tipo Taiwán para generar biogás y fertilizantes en la finca Lodana”**

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 11 de septiembre de 2025.

Lo certifico,



---

Ing. Ángel Vicente Pérez Bravo, M.Sc.

**Docente Tutor**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Alcívar Moreira Génesis Lisseth y Yépez Lombeida Pamela Geovanna, egresadas de la facultad de Ciencias de la vida y Tecnologías, de la carrera de Ingeniería ambiental, libre y voluntariamente declaro que la responsabilidad del contenido de la presente investigación titulada "**Diseño de un sistema de tratamiento de excretas bovinas y caprinas con biodigestor tipo Taiwán para generar biogás y fertilizantes en La Finca Lodana**", corresponde exclusivamente al tutor y patrimonio intelectual de las autoras, dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.



---

Alcívar Moreira Génesis Lisseth  
C.I. 1723054332

**AUTORA**



---

Yépez Lombeida Pamela Geovanna  
C.I. 0750976169

**AUTORA**

## DEDICATORIA

A mi familia, mi mayor soporte y los pilares que sostienen cada uno de mis días, les dedico esta tesis. Su motivación, aliento, apoyo y trabajo incansable me han acompañado a lo largo de toda mi carrera. Como todo viaje que tiene un inicio y un final, hoy llego a la meta con la certeza de que no habría sido posible sin ustedes.

A mi bondadosa abuela, Celinda Vergara, por su infinito amor, apoyo incondicional, guía sabia y consejos que siempre me impulsaron a mejorar.

A mis padres, Mario Alcívar y Liliana Moreira, cuyo sacrificio, esfuerzo, paciencia infinita y cuidado protector han forjado el camino que hoy me trae hasta aquí.

A mis hermanos, Junior y Diego, que con su compañía constante y valentía silenciosa han fortalecido el lazo profundo que nos une.

A mis queridos tíos, Enny, Tania, Patricia, Rolando y demás familiares, por su preocupación, apoyo incondicional y palabras llenas de sabiduría, que me han dejado valiosas enseñanzas y han sido piezas clave para la culminación de este trabajo.

A mis primas, Emily y Melany, cómplices y pilares en los días más agotadores, como hermanas que la vida me regaló, presentes en cada decisión y momento importante de estos años de preparación académica, compartiendo risas, apoyo y recuerdos que atesoro. Y a todas las personas que, de una u otra manera, han sido parte de este recorrido, les extiendo mi gratitud más sincera.

Finalmente, me dedico esta tesis, porque este proceso me enseñó a madurar, a ser perseverante, resiliente e inquebrantable; a creer más en mis capacidades y a superar cada desafío con determinación y valentía. Cada hora de esfuerzo se ve reflejada en este logro que hoy comparto con orgullo.

***Alcívar Moreira Génesis Lisseth***

***Autora***

## DEDICATORIA

Dedico este sueño hecho realidad a Dios, porque en los días más oscuros fue mi luz, en mis miedos más profundos fue mi refugio, y en mis batallas más duras fue la fuerza invisible que me sostuvo cuando sentía que no podía más.

A mis padres, Bertha María y Geovanny Miguel, porque su amor no conoce fronteras ni cansancio. Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba, por entregar sus desvelos y su sudor para que pudiera tener una educación que honre cada sacrificio suyo. Este triunfo lleva sus huellas, porque está tejido con su esfuerzo incansable y su fe que jamás se quebró.

A mis hermanas, Paula y Nayeli, por ser la voz que me animaba cuando el silencio dolía, por las risas que curaron mis días grises, y por siempre decirme que están orgullosas de la ingeniera en la que me estoy convirtiendo.

A mi biólogo, Raziél, mi calma y mi tempestad, mi impulso silencioso, el recordatorio constante de que soy capaz de romper los límites que yo misma creía tener, y por regalarme esos abrazos de oso que llenan mi corazón de amor.

Y a mí... porque lejos de los abrazos de mamá y en una ciudad donde la vida se mide con cautela, aprendí a secar mis lágrimas y seguir. Porque, aún con miedo, avancé. Porque supe, con la certeza que nace en el alma, que mi historia apenas comienza, y que un día miraré atrás y veré que me convertí en alguien mucho más grande que las pruebas que intentaron detenerme.

***Yépez Lombeida Pamela Geovanna***

***Autora***

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, en quién depósito todo mi esfuerzo, recordando siempre: “*Cuando hagan cualquier trabajo, háganlo de todo corazón*” (Colosenses 3:23); por darme vida, salud, por iluminar mis días oscuros con su infinito amor, y sostenerme cuando todo se me venía abajo, por bendecirme con la oportunidad de cumplir este sueño de estudiar esta carrera, que por tanto tiempo anhele y escucho mis oraciones.

A mis Padres, Hermanos, Abuela, Tíos, Primos y demás familiares, que me han tendido la mano siempre que lo he necesitado, de manera oportuna e incondicional, con cada granito de arena sumada a este esfuerzo que hoy se plasma en esta tesis, gracias por creer en mí incluso los días en lo que yo dudaba, por empujarme cuando no sabía cómo caminar, por compartir conmigo, risas, interminables horas de desvelo y dedicación, este logro no es solo mío, sino de cada uno de ustedes, que hoy se refleja en esos gestos, manos y miradas que me recordaran que nunca estaré sola, si los tengo a ustedes.

A mis amigos que son parte importante de este proceso, que Dios y la vida se encargó de hacernos coincidir en el momento perfecto, a Pamela, Freddy, Dumar, por recibirme de manera amistosa y familiar cuando siendo foránea no conocía ningún rostro en esta inmensa ciudad que era totalmente nueva para mí, a la mami Chela, por sus infinitas muestras de bondad y cariño, agradezco infinitamente, sus consejos y palabras llenas de la sabiduría.

Finalmente agradecer a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, por abrirme las puertas para avanzar, superar mis límites y permitirme formar como una profesional, y a mi tutor de tesis, por su guía, confianza y motivación.

***¡Gracias por creer en mi capacidad de lograrlo!***

***Alcívar Moreira Génesis Lisseth***

***Autora***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco con todo mi corazón a Dios, por ser la fuerza que nunca me dejó caer, y la luz que iluminó mis pasos en los momentos más difíciles.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, por facilitarme los recursos académicos y el ambiente propicio para el aprendizaje y la investigación.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Ambiental, por compartir su experiencia y conocimientos que enriquecieron mi formación profesional. En especial, expresar mi más profundo agradecimiento a mi asesor de tesis, Ing. Ángel Pérez Bravo, Mg.Ag., gracias por compartir su conocimiento y enseñarme que aprender es un camino de vida, por inspirarme a seguir adelante con ganas y dedicación.

A mi familia, y especialmente a mis padres, por su amor infinito, su paciencia que no conoce límites y por estar siempre ahí, apoyándome sin importar qué. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

A mis amigos Dumar, Freddy, Génesis y Miyaed, gracias por ser ese refugio seguro y ese abrazo cuando más lo necesitaba, por acompañarme en cada paso y hacer este camino menos solitario.

A la mami Chela y a Don Pedro, por abrirme las puertas de su hogar con tanto cariño, y por ser ese lugar donde encontré paz y esperanza cuando más lo necesitaba.

***Yépez Lombeida Pamela Geovanna***

***Autora***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	viii
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
1.1.    Antecedentes .....	1
1.1.1.    Introducción .....	3
1.1.2.    Planteamiento del problema .....	4
1.1.3.    Justificación .....	5
1.1.4.    Objetivos.....	6
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
2.1.    Marco teórico.....	7
2.1.1.    Biodigestor.....	7
2.1.2.    Funcionamiento de los biodigestores .....	7
2.1.3.    Digestión anaerobia .....	8
2.1.4.    Principios de la digestión anaeróbica en la producción de biogás..	8
2.1.1.    Biogás.....	9
2.1.2.    Usos del biogás.....	9
2.1.3.    Producción de biogás .....	10
2.1.4.    Biogás en Ecuador .....	11
2.1.5.    Tipos de biomasa.....	11
2.1.6.    Tipos de biodigestores .....	12

2.1.7. Procesos de conversión de biomasa a energía .....	12
2.2. Marco legal.....	13
CAPÍTULO III .....	14
3.1. Materiales y Métodos .....	14
3.1.1. Factores Climáticos.....	14
3.2. Metodología.....	14
3.2.1. Enfoque de la investigación .....	14
3.2.2. Variables .....	15
3.2.3. Diseño del biodigestor tipo Taiwán .....	15
CAPÍTULO IV .....	16
4.1. Resultados .....	16
4.1.1. Características, composición y cálculos de la cantidad de los residuos orgánicos bovinos y caprinos .....	16
4.1.2. Diseño del biodigestor tipo Taiwán en función de las características de los residuos orgánicos. ....	24
4.1.3. Manual de manejo y mantenimiento del biodigestor tipo Taiwán, orientado a la producción sostenible de biogás y fertilizantes orgánicos...	41
8.1. Discusión .....	59
CAPÍTULO VI .....	61
5.1. Conclusiones.....	61
5.2. Recomendaciones .....	62
ANEXOS .....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67

## CAPÍTULO I

### 1.1. Antecedentes

Alva Bravo (2023) desarrolló la investigación enfocada en *Diseñar un biodigestor tipo Taiwán con el propósito de generar biogás mediante residuos de excrementos de origen bovino y porcino* en Perú, con el objetivo de evaluar la instalación y funcionamiento de este sistema. El proyecto involucró el diseño y la creación de un biodigestor, también se analizó costos con relación al beneficio y tiempo de inversión del proyecto. Por otra parte, el biodigestor impulsó la producción de biogás y demostró que sí existe una alternativa real y útil para aprovechar esos residuos orgánicos que antes desechábamos. Por tanto, se llegó a la conclusión de que este tipo de biodigestor funciona en condiciones sostenibles y sustentables, lo que podría ser una excelente opción para implementaciones futuras.

El autor Patarroyo (2022) realizó el estudio *Diseño de biodigestor a partir de residuos de excreta de porcino en Colombia*, cuyo propósito fue medir la eficiencia energética de esta en las pequeñas granjas. La metodología aplicada en esta investigación fue el diseño, construcción y análisis del rendimiento de dicho biodigestor. Tras los análisis realizados se pudo determinar que el ahorro energético fue de 21,3 Kw/h por día y que por lo tanto es una alternativa que se puede utilizar en proyectos de biogás sostenible.

Asimismo, Barrena *et al.* (2019) llevaron a cabo un estudio titulado *Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú*, con el objetivo de instalar un biodigestor para producir biogás y bioabonos destinados al desarrollo de pastos. Para ello, emplearon un proceso de digestión anaeróbica, mezclando estiércol y agua en una proporción de 1:5, y manteniendo una temperatura constante de 14,4 °C. Los resultados mostraron que el biogás producido fue eficaz como fuente de combustible para la cocina, mientras que los subproductos biol y biosol se demostraron como excelentes fertilizantes orgánicos, promoviendo un mayor crecimiento del pasto.

Finalmente, Pérez (2021) realizó el estudio experimental *Producción y evaluación de biogás en un biodigestor usando estiércol de vaca en el Cantón Milagro, Provincia del Guayas*, con el objetivo de determinar la producción de biogás en un biodigestor utilizando estiércol de vaca. La investigación tuvo lugar cuando se censó que la electrificación de la economía ha aumentado la movilización de recursos físicos y energéticos para la eliminación de desechos sólidos, lo que da como resultado un medio ambiente degradado.

Los tratamientos fueron tres: T1 20 kg: 25L, T2 25 kg: 30 L y T3 30 Kg: 35L. Las variables utilizadas fueron pH, temperatura, concentración de nutrientes y cantidad producida de biogás. La producción mayor de pH fue la encontrada en el tratamiento T3 con pH neutro, el porcentaje de nutrientes fue de 71% y la mayor producción de biogás (6,75 l/kg de lixiviado), superando a los otros tratamientos. Existen estudios que argumentan la posibilidad de los biodigestores por sus ventajas tanto en la eliminación de los residuos contaminantes como en la generación de energía alternativa mientras aprovechan los residuos generados por la actividad agropecuaria.

### 1.1.1. Introducción

La combustión de combustibles fósiles es la principal causa del cambio climático, según Molina *et al.* (2017) informa que se genera el 73% de contaminación a partir de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones contribuyen al calentamiento global y cambian el clima del planeta. Los combustibles fósiles se usan de acuerdo con las siguientes áreas: el transporte es del 18%, la construcción 19%, la misma cantidad utiliza la generación de electricidad, 43%. Por lo tanto, el sector energético es uno de los emisores de gases de efecto invernadero y uno de los elementos del fenómeno del cambio climático.

Ante esta problemática, a nivel mundial se han impulsado diversas iniciativas para desarrollar fuentes de energía con bajas emisiones de GEI. Entre las alternativas, la biomasa se ha posicionado como una opción viable, particularmente a través de la degradación bioquímica de residuos orgánicos. Este proceso implica la descomposición de materia orgánica mediante microorganismos en ausencia de oxígeno (Spellman 2014), un fenómeno conocido como digestión anaerobia (Cheng 2017). Como resultado, se genera biogás, una mezcla de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) con potencial para ser utilizado como fuente de energía (Spellman 2014; Cheng 2017).

En Ecuador, desde la década de 1970, el Instituto Nacional de Energía (INE), en conjunto con la Organización Latinoamericana de Energía, promovió el uso de biodigestores a nivel nacional. En 1980, se realizaron investigaciones en las provincias de Guayas, Manabí y Chimborazo, lo que resultó en la instalación de 65 biodigestores, en su mayoría de tipo Taiwán, aunque solo el 35% permanecieron operativos. Durante los años 2010 al 2012 las Escuelas de Revolución Agraria implementaron programas de formación orientados a los productores para instalar con autofinanciamiento, estimulando la conducta hacia la adopción de la innovación, fortaleciendo de este modo su adopción en el sector agropecuario (MAE 2015).

Cambio e innovación constantemente generan impactos en nuestro entorno, alterando nuestro día a día y promoviendo la implementación de estrategias que reduzcan la huella dañina que se le causa al planeta. En este panorama es que se basa el presente proyecto para el diseño de un sistema de tratamiento en base a un

biodigestor tipo Taiwán para ser aplicado en la Finca Experimental Lodana, de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

La mencionada institución de nivel superior que cuenta entre sus logros con la facultad de Ingeniería Ambiental, el único en la región que ofrece la carrera mencionada, promueve la implementación de tecnologías sustentables y de bio energías a partir de la utilización de residuos sólidos orgánicos, enmarcada en la gestión para la reducción de emisión de gases de efecto invernadero.

El objetivo general de la propuesta en estudio se circunscribe al diseño de un biodigestor con el que gestionar eficientemente los residuos orgánicos bovinos y caprinos producidos en la finca, para sintetizar biogás y fertilizantes orgánicos como fuentes de energía y nutrientes renovables. Además, se busca elaborar un manual para la operación y mantenimiento del sistema que garantice su viabilidad operativa y concienciar a la comunidad universitaria sobre la importancia de la bio-remediación y prácticas ambientales responsables.

### **1.1.2. Planteamiento del problema**

La capa de ozono se ve afectada constantemente por la emisión de gases de efecto invernadero, entre ellos el metano, un gas que se genera durante la descomposición de residuos orgánicos (IPCC 2021). Esta acumulación de metano contribuye al calentamiento global y altera el equilibrio atmosférico, acelerando el deterioro de la estratósfera (NASA 2022); como es de conocimiento en la Finca Experimental Lodana se producen residuos orgánicos por las diferentes actividades de ganadería bovina, porcina y caprina, los cuales no llevan una adecuada gestión de disposición final, lo que como consecuencia termina en desperdiciar una potente fuente de biomasa natural, que puede ser aprovechada para un beneficio sustentable y de producción de energía renovable a bajo costo y poco mantenimiento.

La implementación de biodigestores se ha consolidado como una estrategia eficaz para la conservación de recurso naturales, específicamente los relacionados con el suelo y las fuentes hídricas, y al mismo tiempo, ofrece alternativas ambientales y económicas sostenibles a largo plazo (Torres *et al.* 2020). Asimismo, los lixiviados resultantes de su uso han sido aplicados como fertilizantes en cultivos relacionados con pasto estrella, mejorando la calidad del suelo y reduciendo la contaminación

producida (Universidad Nacional Abierta y a Distancia [UNAD], 2018). Asimismo, en diversas comunidades rurales de Colombia, la instalación de biodigestores ha demostrado ser una alternativa sostenible que mejora la calidad de vida, proporcionando energía limpia y fertilizantes orgánicos, lo que contribuye al desarrollo agroecológico y económico de la región (Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA], 2019).

Con el fin de promover la utilización de energías limpias y posicionarse como un referente en innovación universitaria, el diseño y propuesta del biodigestor tipo Taiwán será una catapulta hacia la conservación del ambiente, sirviendo de ejemplo tanto para otras universidades del país como para los habitantes de la región. En este sentido, este proyecto representa la oportunidad de reaprovechar óptimamente las excretas generadas por las labores agrícolas y pecuarias, al igual que los residuos orgánicos diarios para convertirlos en recursos útiles y sostenibles.

### **1.1.3. Justificación**

La gestión incorrecta de los residuos orgánicos colectados como parte de la actividad pecuaria puede importar un costo en términos ambientales y una pérdida de recursos que podrían ser aprovechados. El establecimiento de un sistema de reciclaje a partir de un biodigestor tipo Taiwán surge como una solución tecnológica realista por medio de la cual los residuos provenientes de bovinos y caprinos pueden ser convertidos en biogás, una fuente renovable de energía, y en fertilizantes orgánicos que pueden ser reincorporados al proceso agrícola.

De esta manera, el proyecto en cuestión abordará la implantación de prácticas más sostenibles relacionadas con la agropecuaria en la Finca Experimental Lodana de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y fomentará la independencia energética, el manejo sostenible de residuos y la productividad agrícola utilizando biofertilizantes.

## **1.1.4. Objetivos**

### **1.1.4.1. *Objetivo General***

Diseñar un sistema de tratamiento basado en un biodigestor tipo Taiwán para la producción de biogás y fertilizantes orgánicos en la Finca Experimental Lodana de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

### **1.1.4.2. *Objetivos Específicos***

- Determinar los datos para el cálculo de la cantidad, composición y características de los residuos orgánicos bovinos y caprinos orientados a la producción de biogás y fertilizantes orgánicos generados en la Finca Experimental Lodana.
- Establecer los parámetros técnicos para el diseñar un biodigestor tipo Taiwán en función de las características de los residuos orgánicos generados en la Finca Experimental Lodana.
- Elaborar un manual de manejo y mantenimiento del biodigestor tipo Taiwán, orientado a la producción sostenible de biogás y fertilizantes orgánicos.

## CAPÍTULO II

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Biodigestor

La transformación ocurre gracias a la acción de bacterias sobre la mezcla, liberando su energía química en tres fases principales: hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis, lo que convierte las sustancias orgánicas biodegradables en productos intermedios que finalmente generan una mezcla gaseosa conocida como biogás, que será explicada posteriormente (Alva Bravo 2023).

Se trata de una solución práctica y accesible para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, especialmente en áreas rurales. Este proceso transforma principalmente el estiércol animal en gas metano, permitiendo sustituir la leña, el gas propano y la electricidad, además de generar abono para los cultivos. De esta manera, no solo se reducen los costos de producción familiar, sino que también se favorece la protección del medio ambiente (Medina y Toro 2019 p. 18).

Una de sus principales funciones es disminuir la contaminación y producir biogás, lo que contribuye a mejorar la rentabilidad de los pequeños y medianos productores agrícolas en distintas regiones (León 2019). El biodigestor es un contenedor o tanque construido con diversos materiales como ladrillo, cemento o plástico. Su diseño puede ser esférico o cilíndrico y cuenta con un conducto a través del cual se introduce materia orgánica y agua. Al ser procesados, estos elementos generan material orgánico (González 2011).

#### 2.1.2. Funcionamiento de los biodigestores

El proceso de digestión anaerobia que permite el funcionamiento de un biodigestor se desarrolla en varias fases consecutivas, cada una mediada por diferentes grupos bacterianos que intervienen en la descomposición de la materia orgánica. Los grupos bacterianos clave para este proceso se encuentran de manera natural en los estiércoles animales, lo que permite que cualquier tipo de estiércol pueda ser utilizado como materia prima sin necesidad de añadir más que agua (Nunes *et al.*, 2019). En cambio, otros materiales orgánicos, como los residuos industriales o de cosecha, no cuentan con estos microorganismos esenciales, aunque es posible utilizarlos como

materia prima principal mediante una adecuada inoculación inicial (Singh *et al.*, 2020). En estos casos, al iniciar el biodigestor, se debe agregar una carga inicial que contenga las bacterias necesarias, lo que permite que cualquier tipo de materia orgánica pueda ser utilizada para generar los subproductos deseados (Hernández y López 2023).

### **2.1.3. Digestión anaerobia**

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo de descomposición que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual la materia orgánica, incluidos los residuos animales y vegetales, se transforma en productos como biogás y bioabono, principalmente debido a las reacciones de óxido-reducción realizadas por bacterias metanogénicas (Bautista 2010).

El tratamiento anaerobio radica en un proceso microbiológico no oxigenante, donde la materia orgánica es convertida por la acción de los microorganismos en biogás y bioabono. Este proceso implica una serie de reacciones bioquímicas en las que algunos de los compuestos orgánicos son completamente oxidados, generando dióxido de carbono, mientras que otros son reducidos en un alto grado para formar metano (González y Olaya 2012).

### **2.1.4. Principios de la digestión anaeróbica en la producción de biogás**

Además de la capacidad de vivir sin oxígeno, las bacterias productoras de biogás tienen otra característica especial, se encuentran entre los organismos, muy pequeños organismos eso puede digerir la celulosa. Otra característica especial de estos organismos es que son muy sensibles a las condiciones de su entorno como temperatura, nivel de acidez, cantidad de agua, nivel de concentración, entre otros (Jameel *et al* (2024).

El proceso de producción de biogás incluye básicamente la descomposición de materiales orgánicos durante bioquímico transformaciones y cambios, lo que provoca la descomposición de moléculas grandes en moléculas más pequeñas. Las bacterias metanogénicas, que llevan a cabo reacciones anaeróbicas y de descomposición para producir biogás, son capaces de descomponer y descomponer materiales orgánicos complejos y simples, lo que finalmente conduce a la producción de biogás.

Estas bacterias incluyen dos categorías de bacterias mesófilas y termófilas y pueden vivir a temperaturas de 37 a 45 °C y de 50 a 52 °C, respectivamente. En el caso de las bacterias termófilas, esta temperatura puede aumentar hasta 70 °C. A esta temperatura, las bacterias tienen más actividad enzimática para descomponer la materia orgánica y producir biogás (Liu *et al.* 2016).

### **2.1.1. Biogás**

El biogás se refiere a la mezcla de gases producida por la fermentación anaerobia de la materia orgánica. La mezcla estandarizada generalmente consiste en un promedio del 60% de metano y 40% de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, con rastros de otros excedentes de nitrógeno, hidrógeno y ácido sulfhídrico. Estas proporciones varían, y el gas puede contener incluso más del 70% de metano. La propiedad más atractiva del biogás es el alto poder calorífico del metano, su valioso subproducto (Hernández y López 2023).

### **2.1.2. Usos del biogás**

El uso de biogás como fuente de energía alternativa en los hogares ayuda a reducir el impacto ambiental causado por el uso de combustibles derivados del petróleo y la madera en actividades domésticas. Además de producir biogás como combustible, el biodigestor genera un residuo orgánico rico en nitrógeno, que puede emplearse como abono natural. El nitrógeno es uno de los nutrientes esenciales que las plantas requieren para su crecimiento (Pérez *et al.* 2020).

El biogás se quema con una llama azul que tiene una temperatura de 800 °C. Este gas se mezcla con aire en una proporción de 1–20 y tiene una alta velocidad de ignición (Wei *et al.* 2015; Kougias *et al.* 2014; Liu *et al.* 2016). La presión necesaria y óptima para cocinar con biogás es de entre 5 y 20 cm de columna de agua. Quemando uno metro cúbico de biogás produce alrededor de 5.500 a 6.500 kcal de calor, que es suficiente para correr un motor de combustión interna con una potencia de un caballo de fuerza durante dos horas. Un metro cúbico de biogás equivale a 0,4 kg de combustible diesel, 0,6 kg de petróleo y 0,8 kg de carbón.

Tabla 1.

## Compuestos en biogás

Tipo de gas	Disponible en biogás (%)
Metano	55–70
dióxido de carbono	35–40
nitrógeno	0–3
Hidrógeno	0–1
Oxígeno	0–1
Sulfuro de hidrógeno	0–1

Fuente: Jameel *et al* (2024).

## 2.1.3. Producción de biogás

En general, para producir biogás, los materiales orgánicos deben mezclarse con el mismo volumen de agua y después homogeneización, se debe verter en el depósito de digestión. Después del tiempo de retención apropiado, se obtiene gas metano. por supuesto, la producción de gas metano tiene condiciones más óptimas, que deben considerarse para su producción económica (Imagen 1). A continuación, se examinan en detalle los principios de los procesos de digestión y producción de biogás (Umeghalu *et al.* 2012).

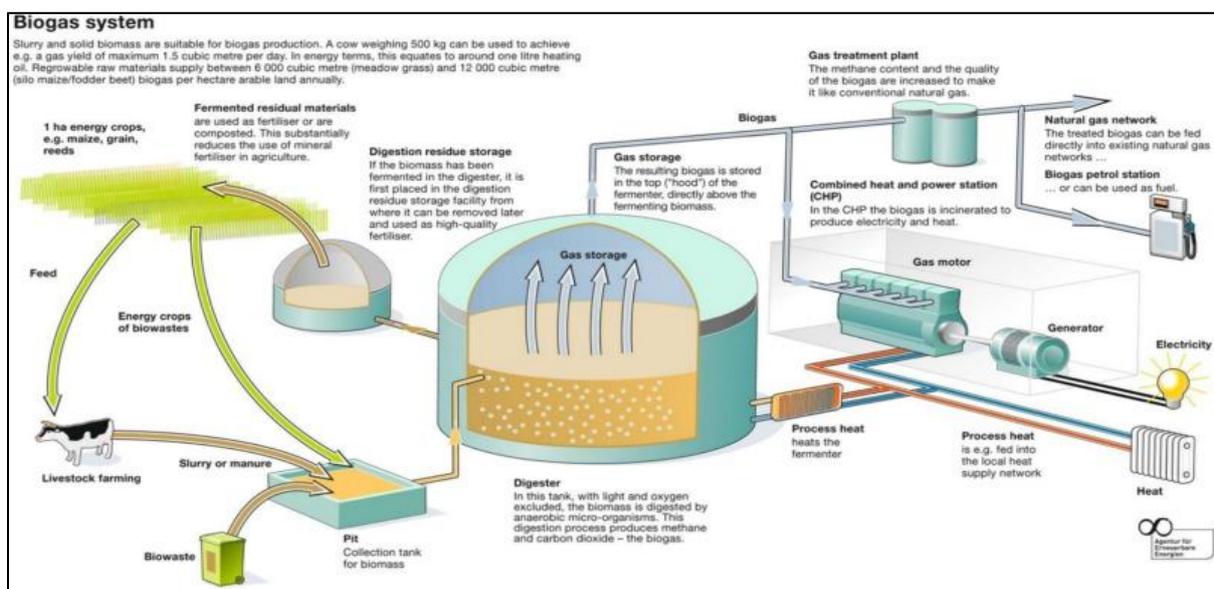


Imagen 1. Sistema de biogás

#### **2.1.4. Biogás en Ecuador**

El biogás en Ecuador se ha utilizado durante varios años, inicialmente como solución a la contaminación, especialmente en sectores como la ganadería, producción de lácteos y cultivos de ciclo corto como maíz y arroz, que generan grandes cantidades de desperdicios orgánicos aptos para biodigestores (Armas 2018). Las regulaciones ambientales ecuatorianas exigen que los productores agroindustriales gestionen estos desechos, lo que ha impulsado el crecimiento de la producción de biogás en el país.

Aparte, dentro de la legislación ecuatoriana, las regulaciones medioambientales exigen a los productores agroindustriales dar tratamiento a los desperdicios que producen sus actividades por lo que en Ecuador la producción del biogás ha estado creciendo desde hace ya varios años (Armas 2018). Aunque no es una práctica común, diversos proyectos buscan reducir costos y la contaminación, promoviendo el aprovechamiento de la materia orgánica a través de biodigestores más eficientes, con empresas como Biodigestores Ecuador liderando esta iniciativa (Dublein y Steinhauser 2008).

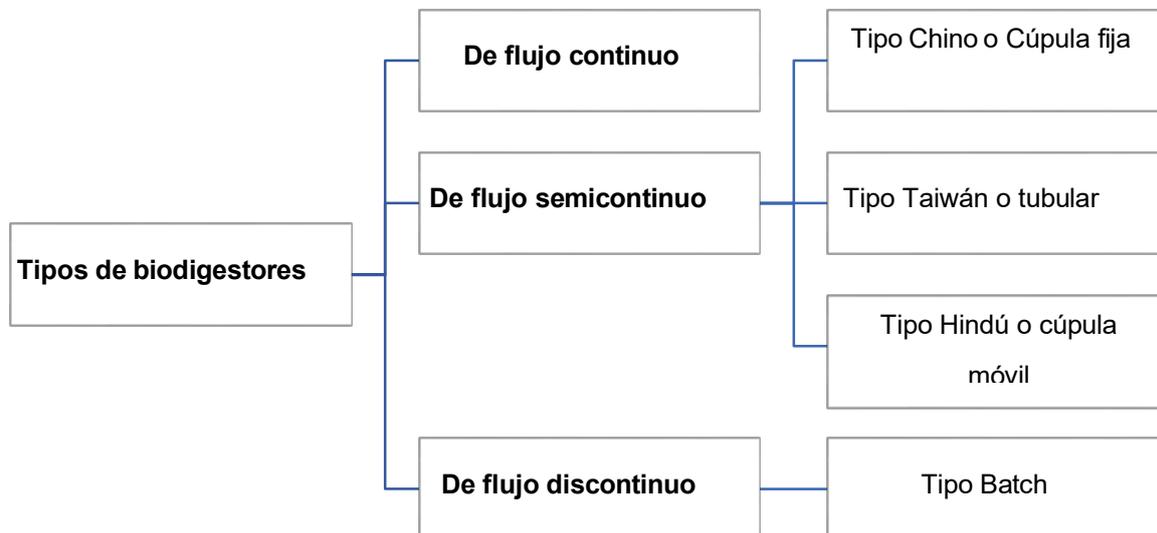
#### **2.1.5. Tipos de biomasa**

La biomasa seca contiene una humedad hasta el 60%, de este tipo de orgánicos se puede aprovechar su energía a través de procesos termoquímicos como la combustión, gasificación o la licuefacción de estos. La biomasa húmeda tiene una humedad mayor al 60%. Este tipo de biomasa se encuentra en residuos vegetales y animales. El residuo de esta fermentación es un compost orgánico que se puede utilizar como fertilizante agrícola por su alto contenido de nutrientes para suelos (Armas 2018).

### 2.1.6. Tipos de biodigestores

De forma didáctica se pueden esquematizar de la siguiente forma:

**Gráfico 1.** *Tipos de biodigestores.*



**Fuente:** Santos (2020)

La producción de biogás en este tipo de biodigestor aumenta progresivamente hasta alcanzar un punto máximo, momento en el que debe vaciarse y recargarse con nueva materia orgánica. Por último, en el proceso semicontinuo, el estiércol se digiere y se almacena, pero su desventaja es que el contenido digerido reduce la capacidad de producción de biogás, resultando en un rendimiento más bajo (Santos 2020; Quispe 2021).

### 2.1.7. Procesos de conversión de biomasa a energía

Desde una perspectiva energética, la biomasa se distingue por su bajo contenido de carbono, alto contenido de oxígeno y presencia de compuestos volátiles. En términos generales, el poder calorífico de los residuos lignocelulósicos se encuentra entre 3000 y 3500 kcal/kg, los residuos urbanos entre 2000 y 2500 kcal/kg, y los combustibles líquidos derivados de cultivos energéticos alcanzan hasta 10000 kcal/kg. Estas características, junto con su bajo contenido de azufre, hacen de la biomasa un recurso atractivo para la producción de energía (Flores 2017).

Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera es neutro. En efecto, el CO<sub>2</sub> generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por lo tanto, no aumenta la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. Al contrario, en el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que está fijo a la tierra desde hace millones de años (Secretaría de Energía 2008).

## **2.2. Marco legal**

El Artículo 13 de la Constitución de la República del Ecuador reconoce el derecho de las personas y colectividades al acceso a alimentos sanos, suficientes y nutritivos, producidos localmente y respetando sus identidades y tradiciones culturales. Por otra parte, en el Registro Oficial Suplemento No. 583 el 5 de mayo de 2009 decretada la Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria, tiene como propósito garantizar mediante mecanismos, que el Estado cumpla con las personas y comunidades la autosuficiencia de proveer alimentos sanos, nutritivos y culturalmente apropiados de manera permanente.

La Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales establece en:

Artículo 5: define que el ámbito agrario “incluye las actividades agrícolas, ganaderas, acuícolas, silvícolas, ecoturismo, agro-turismo y ex situ concordantes, todas orientadas a la utilización productiva de la tierra rural.

Artículo 8, que postula los objetivos de la ley, la promoción de la agricultura familiar campesina, principalmente en producción, comercialización y transformación en este orden y la producción rural sustentable, que será desarrollada para asegurar alimentos sanos, suficientes, higiénicos y nutritivos para asegurar la soberanía alimentaria.

Artículo 49. Promoción de la protección, conservación y recuperación de las tierras rurales y su capa fértil, utilización sustentable de los recursos naturales y fomento a la participación de las comunidades locales en especial la a agricultura familiar campesina con prácticas agrícolas adecuadas.

## CAPÍTULO III

### 3.1. Materiales y Métodos

#### 3.1.1. Factores Climáticos

Los factores climáticos de Lodana están determinados por su cercanía a la costa y el relieve ondulado, presenta un clima tropical con ligeras variaciones estacionales moderadas caracterizado por temperaturas cálidas y una distribución de lluvias.

**Clima:** Tropical, con estacionalidad moderada, predominando temperaturas cálidas durante todo el año (INAMHI 2024).

**Pluviosidad:** Anual entre 800 y 1000 mm, concentrada en la temporada de lluvias, que ocurre entre enero y abril (Meteoblue 2023).

**Relieve:** Plano a ondulado, adecuado para actividades agrícolas debido al buen drenaje natural del agua (Meteoblue 2023).

**Humedad relativa:** La humedad relativa oscila entre el 70% y 80%, alcanzando valores más altos durante la temporada húmeda debido a la influencia oceánica (INAMHI 2024).

**Temperatura:** Las temperaturas anuales promedio oscilan entre 24°C y 29°C, con variaciones diurnas mínimas (INAMHI 2024).

### 3.2. Metodología

#### 3.2.1. Enfoque de la investigación

##### 3.2.1.1. *Tipo de investigación*

El presente estudio es de tipo no experimental, bibliográfico, mediante la aplicación de conocimientos para diseño, que busca generar conocimiento sobre el potencial energético y fertilizante de los residuos orgánicos animales, sino también ofrecer soluciones prácticas para su aprovechamiento en entornos rurales como la Finca Experimental Lodana.

### **3.2.1.2. *Diseño de investigación***

El diseño utilizado es bibliográfico en consulta de parámetros para calcular con datos de la Finca Experimental Lodana.

### **3.2.2. Variables**

De acuerdo con la naturaleza de la investigación, se definieron las siguientes variables:

#### **3.2.2.1. *Variable independiente***

- Tipo de residuo orgánico utilizado (estiércol de bovino y caprino).
- Cantidad de carga orgánica por tratamiento (kg).
- Relación de mezcla estiércol:agua (1:3).

#### **3.2.2.2. *Variables dependientes***

- Volumen de biogás producido (m<sup>3</sup>).
- pH del efluente.
- Contenido de nutrientes (N, P, K) en el biofertilizante.

### **3.2.3. Diseño del biodigestor tipo Taiwán**

Se propone usar un biodigestor tipo Taiwán, el cual es de fácil manejo, económicamente viable de implementar y puede procesar materia orgánica ilimitada. Este sistema tiene las características idóneas de transformar los desperdicios animales en energía verde y abono natural ayudando así a la sostenibilidad de la granja (Hernández y López 2023). El diseño incluye:

- Cámara de fermentación de polietileno de baja densidad.
- Sistema de tuberías para carga y descarga.
- Trampa de gas con válvula de control.
- Manómetro para monitoreo de presión.

## CAPÍTULO IV

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Características, composición y cálculos de la cantidad de los residuos orgánicos bovinos y caprinos

Para calcular el potencial de producción de biogás y fertilizantes orgánicos a partir de excretas de bovinos y caprinos en la Finca Experimental Lodana, se identificaron y sistematizaron los siguientes datos:

##### 4.1.1.1. *Características y composición de los residuos orgánicos bovinos y caprinos*

Según Tortosa (2019) en España, menciona que las propiedades agroquímicas del estiércol cambian debido al alimento que les dan a los animales, y así se refleja en las diferencias en la composición de los animales. El estiércol fresco de bovino tenía un contenido de agua de 46,1%, además de un pH ligeramente alcalino de 7,47 y una conductividad eléctrica de 7,53 dS m<sup>-1</sup>. Su materia orgánica es alta, con 664 g kg<sup>-1</sup>, de los cuales 185 g kg<sup>-1</sup> son lignina, 122,1 g kg<sup>-1</sup> de celulosa y 325,3 g kg<sup>-1</sup> de hemicelulosa. En lo que a nutrientes se refiere, contiene 369,1 g kg<sup>-1</sup> de carbono orgánico total, 19,4 g kg<sup>-1</sup> de nitrógeno total, 2,5 g kg<sup>-1</sup> de fósforo, 35,8 g kg<sup>-1</sup> de potasio, 63,7 g kg<sup>-1</sup> de calcio y 8,8 g kg<sup>-1</sup> de magnesio. También es de gran importancia para el contenido de micronutrientes como el hierro (1442 g kg<sup>-1</sup>), cobre (23 g kg<sup>-1</sup>) y manganeso (191 g kg<sup>-1</sup>).

Por otra parte, Vera (2013) en México, indica que la cantidad a estimar que se genera directamente en promedio de residuos depende del tipo y tamaño del animal. Un animal adulto grande puede producir hasta 15 kg de excrementos al día y un animal mediano 10 kg. Los bovinos pequeños excretan cerca de 8 kg por día y los terneros aproximadamente 4 kg diarios.

En cambio, el estiércol seco del bovino tiene un menor contenido de agua, 26,23%, y un pH semejante, 7,58. Su conductividad eléctrica es un poco más baja, 6,27 dS m<sup>-1</sup>. La materia orgánica llega a 80,86 g kg<sup>-1</sup>, mientras que el nitrógeno total es de 11,58 g kg<sup>-1</sup>, el fósforo de 6,1 g kg<sup>-1</sup>, y el potasio de 3,20 g

kg<sup>-1</sup>. Los niveles de calcio y magnesio se indican en 4,04 g kg<sup>-1</sup> y 8,8 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Tortosa 2019).

Además, Barros et al (2017) en Colombia, menciona que los caprinos poseen una energía producida de 1,7 MJ/cabezas, que puede corresponder a la cantidad de excremento, que es de 1.6 kg/cabezas; también puede deberse al volumen del biogás en 0,05m<sup>3</sup>/kg, pero su poder calórico es de 1,07 MJ/kg, esto significa que es rentable producir biogás con excrementos caprinos y al utilizar un mayor número de cabezas se generaría una cantidad alta de producción, por lo tanto, la energía obtenida sería más elevada.

El estudio realizado por Salazar et al (2016) de Ecuador, describe que el estiércol caprino presenta una relación carbono/nitrógeno (C/N) a 40:1, lo que lo convierte en un sustrato adecuado para la producción de biogás, ya que mantiene un equilibrio favorable entre nutrientes que favorecen la actividad de los microorganismos metanogénicos. Por tanto, la relación C/N óptima para iniciar la digestión anaeróbica es de 30:1; si los residuos orgánicos no cumplen este valor, deben mezclarse en proporciones adecuadas para alcanzarlo, tal como se evidencia en la tabla 2. En cuanto a su contenido de sólidos totales, se encuentra en un rango de 83,0 a 92,0 %, mientras que los sólidos volátiles representan la fracción biodegradable responsable de la generación de metano durante el proceso de digestión.

## Tabla 2.

### *Parámetros físico-químicos del estiércol*

<b>Parámetro</b>	<b>Bovinos</b>	<b>Caprinos</b>
Humedad (%)	80	75
Sólidos totales (ST) (%)	20	25
Sólidos volátiles (SV/ST)	75	80
Relación C/N	24–25:1	20–22:1
pH	6.8 – 7.2	6.5 – 7.0

**Fuente:** Hernández y López (2023); FAO (2020), MDPI (2022)

Sin embargo, la composición del estiércol caprino refleja un material con alto potencial energético, siempre que se maneje bajo parámetros técnicos que permitan maximizar su aprovechamiento como biomasa renovable. Además, Salazar et al (2016) en Ecuador, indica que el estiércol de caprinos presenta una composición media caracterizada por un 52,8 % de materia orgánica, con un aporte de 1,55 % de nitrógeno total y 2,92 % de fósforo asimilable ( $P_2O_5$ ), lo que lo convierte en un recurso valioso para la fertilización. Además, contiene 0,74 % de potasio ( $K_2O$ ), 3,20 % de calcio ( $CaO$ ) y 0,57 % de magnesio ( $MgO$ ), elementos que contribuyen a mejorar la calidad del suelo y aportar nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos.

Como fuente de datos primarios, se realizó un levantamiento en campo durante la visita técnica a la finca ubicada en la parroquia Lodana, cantón Santa Ana, provincia de Manabí. En el predio se constató la existencia de 6 bovinos (3 de talla grande y 3 de talla mediana) y 12 caprinos en condiciones de pastoreo semi-intensivo. Este registro constituye la base real del estudio, pues refleja el número exacto de animales disponibles como insumo para la alimentación del biodigestor.

Para cuantificar la disponibilidad de materia prima (estiércol), se recurrió a fuentes secundarias especializadas que reportan la producción diaria de excretas según especie y peso vivo. Según la *Environmental Protection Agency* (EPA 2004) en Estados Unidos, y estudios de extensión agropecuaria realizados por Rojas (2017) y Lombo et al. (2022), un bovino adulto puede producir entre 20 y 30 kg/día de heces, dependiendo de su tamaño corporal. En el presente estudio se asumieron valores de 32 kg/día para bovinos grandes y 22 kg/día para bovinos medianos, en concordancia con dichos rangos.

En el caso de los caprinos, literatura técnica (Guerrero 2019; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] 2021) indica que un ejemplar adulto produce entre 0,3 y 2,0 kg/día de estiércol, variando con dieta y manejo. Para fines de diseño se adoptó un valor de 2,5 kg/día por cabra, considerando que en la finca se trata de animales adultos destinados a producción cárnica y lechera.

#### 4.1.1.2. Cálculos de los residuos orgánicos bovinos y caprinos

Con base en estos coeficientes, los volúmenes diarios de excretas se calcularon considerando los promedios reportados en la literatura: los bovinos adultos grandes producen entre 30 y 35 kg/día de estiércol fresco (EPA 2004; Lombo 2022), los bovinos medianos generan entre 20 y 25 kg/día (Rojas 2017), y los caprinos producen de 2 a 3 kg/día (Guerrero 2019; FAO 2021).

#### Cantidad de estiércol diario (CE)

En la finca:

$$Carga\ diaria\ (kg/día) = \sum_{n=1}^n (Ni \times Pi)$$

Datos:

Ni = número de animales del tipo i,

Pi = producción diaria de estiércol por animal del tipo i (kg/día).

$$Carga\ diaria\ \frac{kg}{día}\ (CE) = \sum_{n=1}^n (Ni \times Pi)$$

$$CE_1\ de\ bovinos\ grandes = 3 \times 32\ kg/día = 96\ kg/día$$

$$CE_2\ de\ 3\ bovinos\ medianos \times 22\ kg/día = 66\ kg/día$$

$$CE_3\ de\ 12\ cabras \times 2.5\ kg/día = 30\ kg/día$$

$$CE_t = CE_1 + CE_2 + CE_3$$

$$CE_t = 96 + 66 + 30 = 192\ kg/día$$

Producción total estimada es de 192 kg/día de excretas frescas. Estos resultados constituyen la línea base para el diseño del biodigestor tipo Taiwán, asegurando que el dimensionamiento responde a las condiciones reales de la finca, a la vez que se sustenta en parámetros validados por la literatura técnica.

#### 4.1.1.3. *Temperatura*

Según Water Supply EC (2022) de Ecuador, el proceso de digestión anaeróbica se desarrolla adecuadamente con temperaturas ambientales entre 26,2 °C y 38,7 °C, lo que garantiza condiciones favorables para la producción de biogás. Estos resultados coinciden con lo reportado por Yáñez (2023) en Ecuador, quien registró valores entre 27,7 °C y 36 °C, evidenciando una adecuada estabilización térmica. Estos rangos se encuentran dentro del intervalo óptimo de 25 °C a 40 °C para el desarrollo de microorganismos mesófilos, como se muestra en la tabla 3 considerando que los valores registrados se basan en estudios bibliográficos analizados en el presente estudio.

**Tabla 3.**

*Monitoreo y control de la Temperatura*

<b>Tiempo de Retención</b>	<b>Hora</b>	<b>Temperatura °C Ambiente</b>	<b>Temperatura °C Biomasa</b>
3	13h00	29,8	28,5
6	11h50	38,7	36
9	10h00	36,7	33,4
12	15h30	32,9	29,8
15	16h45	31,1	32,7
18	10h45	30,3	30,5
21	17h26	32,2	32,3
24	12h11	29	27,7
27	14h57	26,2	27,7
30	14h45	30,5	31,6

**Fuente:** Yáñez 2023

#### 4.1.1.4. *Consideraciones del Potencial hidrógeno pH*

En cuanto al pH, Pelegrín (2021) de España, sugiere mantener los niveles neutros con valores de 7,51 y 7,24, lo cual se considera un rango óptimo para el desarrollo de microorganismos (Yáñez 2023). Los datos presentados son bibliográficos y se consideran como referencia para la futura implementación del biodigestor.

#### 4.1.1.5. Volumen de biogás

La información reportada por Yáñez (2023), que muestra una producción diaria de metano (CH<sub>4</sub>) entre 380 y 560 ml con incrementos promedio de 20 ml, y variaciones específicas de 30 ml en el día 37 y 10 ml en el día 41 en la tabla 4, resulta de utilidad porque proporciona un referente experimental que permite contrastar y ajustar los cálculos de generación de biogás a partir de los residuos orgánicos bovinos y caprinos de la Finca Experimental Lodana.

**Tabla 4.**

*Monitoreo y control de producción de biogás*

<b>Tiempo de Retención</b>	<b>Biogás Valor Inicial (ml)</b>	<b>Biogás Valor Final (ml)</b>	<b>Volumen diario CH<sub>4</sub> (ml)</b>
35	340	720	380
36	350	750	400
37	380	810	430
38	450	900	450
39	430	900	470
40	420	910	490
41	400	900	500
42	480	1000	520
43	430	970	540
44	420	980	560

**Fuente:** Yáñez 2023

#### 4.1.1.6. Relación carbono/nitrógeno

Según Zhang y Jahng (2012), una relación carbono/nitrógeno (C/N) de dos tipos de estiércol se encuentra dentro del rango ideal de 20:1 a 30:1 para la digestión anaeróbica, lo que contribuye a la estabilidad del proceso. Además, el pH neutro de estos residuos es adecuado para mantener la actividad metanogénica. Ambos estiércoles tienen un pH ligeramente neutro, comprendido entre 6.5 y 7.2, favoreciendo así la actividad microbológica, especialmente la de los

microorganismos metanogénicos responsables de la producción de biogás.

En cuanto a la relación C/N, el estiércol bovino se sitúa entre 24:1 y 25:1, mientras que el caprino está entre 20:1 y 22:1, lo que significa que por cada parte de nitrógeno hay entre 20 y 25 partes de carbono según se demuestra en la tabla 5. Esta proporción es óptima, porque proporciona un balance adecuado entre la fuente de energía (carbono) y los nutrientes esenciales (nitrógeno) para el desarrollo microbiano.

**Tabla 5.**

*Parámetros físico-químicos del estiércol*

<b>Parámetro</b>	<b>Bovinos</b>	<b>Caprinos</b>
Humedad (%)	80	75
Sólidos totales (ST) (%)	20	25
Sólidos volátiles (SV/ST)	75	80
Relación C/N	24–25:1	20–22:1
pH	6.8 – 7.2	6.5 – 7.0

**Fuente:** Hernández y López (2023); FAO (2020), MDPI (2022)

Mantener una relación C/N dentro de este rango permite una fermentación estable y eficiente, evitando tanto la acumulación de amoníaco por exceso de nitrógeno como la ralentización del proceso por exceso de carbono. Por tanto, la calidad de los residuos orgánicos disponibles en la finca garantiza condiciones óptimas para maximizar la producción de biogás y minimizar riesgos de inhibición en el proceso.

**Tabla 6.**

*Estimación de biogás generado semanalmente*

<b>Tipo de animal</b>	<b>SV estimado (kg)</b>	<b>Producción de biogás (m<sup>3</sup>/kg SV)</b>	<b>Producción semanal (m<sup>3</sup>)</b>
Bovinos	$162 \times 20\% \times 75\% = 24.3$	0.25	6.08
Caprinos	$30 \times 25\% \times 80\% = 6$	0.23	1.38
Total	-	0.48	7.64 m <sup>3</sup>

**Fuente:** Demirbas 2004

Según estimaciones basadas en la tabla 6 del estudio de Demirbas (2004), la cantidad de sólidos volátiles (VS) y la producción específica de biogás por kilogramo de VS, la generación semanal total de biogás en la finca es de aproximadamente 7,64 m<sup>3</sup>, y la mayoría de la producción (77%) proviene de estiércol bovino. Aunque el estiércol de cabra tiene una mayor densidad de sólidos, su menor volumen limita su contribución general. Esta producción de energía es potencialmente utilizable para la generación de energía eléctrica, contribuyendo así a reducir el consumo de combustibles fósiles.

Para Mshandete et al (2004) en Tanzania, menciona que la composición nutricional del digestato varía según el tipo de estiércol utilizado, el estiércol de vaca, por su mayor volumen y concentración de nutrientes, transporta significativamente más nitrógeno, fósforo y potasio, mientras que el estiércol de cabra, en menores cantidades, completa la carga nutricional del digestato. Según Zhang et al. (2020) en China. Indican que estas diferencias representan la variabilidad de la materia orgánica y los nutrientes presentes en los residuos animales, lo que también tiene un efecto sobre el potencial fertilizante del digestato.

Asimismo, el digestato semanal generado debería contener aproximadamente 8.75 kg de nitrógeno, N, 3.5 kg de fósforo, P, y 6.91 kg de potasio, KS. Esta cantidad de nutrientes confirma el potencial como fertilizante orgánico barato y valioso. Este nivel es comparable a algunos fertilizantes comerciales, especialmente en sistemas de producción agroecológicos que promueven el uso de insumos orgánicos.

El uso de digestato como fertilizante cierra el ciclo de nutrientes en la finca y al mismo tiempo disminuye el uso de fertilizantes químicos. Además, mejora la estructura del suelo porque contiene materia orgánica lo que a su vez favorece la retención de agua y el desarrollo de la actividad microbiana beneficiosa para los cultivos. Como afirman Amon et al. (2007), estas propiedades hacen del digestato un muy buen recurso para prácticas agrícolas sostenibles y eficientes.

#### **4.1.2. Diseño del biodigestor tipo Taiwán en función de las características de los residuos orgánicos.**

##### **4.1.2.1. Datos obtenidos**

En la primera etapa de instalación y mantenimiento del biodigestor tipo Taiwán, se registran datos mediante monitoreo sin causar compromiso en el sistema, lo que en la actualidad es primordial para evaluar. Por otra parte, existe un aumento gradual del volumen, lo cual está directamente relacionado con la producción de biogás (Yáñez 2024).

Asimismo, el autor anteriormente mencionado, indica que después de un período estimado de 18 días de sellado hermético, se espera que la biomasa alcance la fase de metanogénesis, evidenciada por un incremento notable en el volumen de gas generado, con potencial de superar la capacidad de la zanja. Para evitar pérdidas por baja presión, se deberá garantizar un sistema de almacenamiento eficiente que permita la conducción adecuada hacia la manguera de captación. El biodigestor se proyecta trabajar en un rango de 26 °C a 32 °C, siendo óptimo mantener la temperatura entre 27 °C y 32 °C, condición favorable para la actividad bacteriana y la estabilidad del proceso anaerobio.

De acuerdo con Yáñez (2023), el monitoreo debe realizarse en días y horas específicas (6, 9, 18 y 45 en la mañana; 24 al mediodía; y 3, 12, 15, 21, 27, 30, 33 y 36 en la tarde), considerando la distancia y ubicación del biodigestor para registrar variaciones térmicas y de producción de gas. Estos lineamientos permitirán analizar la respuesta operativa del sistema y establecer criterios de manejo y optimización para garantizar una producción sostenible de biogás y fertilizantes orgánicos en la finca Lodana.

##### **4.1.2.2. Periodo de diseño**

El intervalo de diseño del biodigestor tubular se caracteriza por el tiempo durante el que el sistema debe operar de manera eficaz y óptima, asegurando una producción adecuada de biogás y un tratamiento eficiente de los residuos orgánicos producidos. Este intervalo considera la resistencia de los materiales,

las condiciones de operación anticipadas y el mantenimiento programado.

Según la norma ISO 15686-1:2011, que define los fundamentos generales para la planificación de la vida útil de edificios y sus elementos, se sugiere establecer un periodo de diseño que garantice tanto la funcionalidad como la seguridad del sistema a lo largo de su vida útil proyectada. Para sistemas de digestión anaeróbica de pequeña y mediana capacidad, investigación técnica y directrices internacionales, tales como el Manual elaborado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, se establece un periodo de diseño de entre 8 y 12 años, dependiendo de la calidad de los materiales y del mantenimiento realizado (FAO 2005).

En este proyecto, se seleccionó un periodo de diseño de 10 años, considerando la durabilidad de los materiales escogidos como geomembranas, tuberías, accesorios, asimismo, las condiciones ambientales y operativas específicas del lugar. Este tiempo permite planificar de manera efectiva el reemplazo o mantenimiento de componentes vitales y asegurar la continuidad en la producción de energía y gestión de residuos orgánicos.

#### **4.1.2.3. Memoria de cálculo**

La memoria de cálculo establece las pautas para dimensionar y asegurar el rendimiento efectivo del biodigestor tubular de tipo Taiwán, el cual se define como un sistema semicontinuo de presión baja, fabricado con una geomembrana flexible, y que tiene la capacidad de conservar el biogás dentro de su estructura, operando con un tiempo de retención hidráulica (TRH) que varía entre 30 y 40 días (FAO 2005).

#### **Parámetros de diseño**

Para este proyecto, los parámetros utilizados se definieron según recomendaciones de diseño para biodigestores tipo taiwanés (Weiland 2010; Appels et al. 2008; FAO 2005):

- Tiempo de retención hidráulico (TRH): 35 días.

- Producción específica de biogás: 0,20 – 0,25 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg de sólidos volátiles degradables.
- Relación carbono/nitrógeno (C/N): 20:1 – 30:1 para garantizar estabilidad microbiana.
- Temperatura de operación: Mesofílica (25 – 35 °C) adecuada para condiciones tropicales.

Las dimensiones seleccionadas para el biodigestor, con un diámetro de 2 m, 1,2 de altura y 8,80 m de longitud, responden al volumen útil requerido según la carga diaria de estiércol disponible en la finca (192 kg/día) y el tiempo de retención hidráulico recomendado para asegurar la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica. El diámetro de 2 m garantiza una adecuada relación entre la profundidad y el área de exposición del sustrato, lo que favorece la mezcla y la homogeneidad del material orgánico.

Por su parte, la longitud de 8,80 m permite alcanzar un volumen total suficiente para mantener la biomasa bajo condiciones controladas, evitando problemas de sobrecarga y asegurando una producción de biogás continua y estable. De esta manera, las dimensiones elegidas no solo cumplen con los criterios técnicos de diseño, sino que también se adaptan a la disponibilidad de materia prima y a las necesidades energéticas previstas en la finca.

### 1. Dimensiones del biodigestor

Datos:

**Diámetro D = 2 m**

**Longitud L = 8,80 m**

$$V = \frac{\pi D^2}{4} * L$$

$$V = \frac{3.1415 * 4 \text{ m}}{4 \text{ m}} * 8,80 \text{ m}$$

$$V = 27,65 \text{ m}^2$$

## 2. Cálculo del volumen del biodigestor

El volumen del biodigestor se determina mediante:

$$v = Q \times RT$$

**Donde:**

**V** = volumen del biodigestor (m<sup>3</sup>)

**Q** = volumen diario de sustrato (m<sup>3</sup>/día)

**RT** = tiempo de retención hidráulico (días)

Si la finca genera aproximadamente 1 m<sup>3</sup>/día de mezcla orgánica (estiércol bovino y caprino diluido) y se adopta un TRH de 35 días:

$$v = \frac{1m^3}{días} \times 35 \text{ días}$$

$$v = 35 \text{ m}^3$$

## 3. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo de retención hidráulica (TRH) representa el periodo promedio durante el cual el sustrato permanece en el biodigestor expuesto a la acción microbiana. Se calcula como el cociente entre el volumen útil del reactor y el caudal diario de entrada, siendo un parámetro clave para el dimensionamiento del sistema.

Además, el TRH está estrechamente relacionado con la temperatura de operación: en condiciones psicrófilas (< 20 °C) los rangos aceptables son de 50 a 120 días, en mesofílicas (20–45 °C) de 25 a 50 días, y en termofílicas (> 45 °C) de 15 a 25 días, disminuyendo a medida que aumenta la temperatura debido a la aceleración de la degradación de la materia orgánica (Appels et al. 2011; Gerardi 2003; Weiland 2010). Conocer el caudal diario de alimentación y el TRH permite calcular el volumen útil del biodigestor mediante la expresión:

$$TRH = RH \text{ (días)} \times \text{Caudal diario } T \left( \frac{m^3}{días} \right)$$

$$TRH = 35 \text{ días} \times 1 \text{ m}^3 / \text{días}$$

$$TRH = 35 \text{ m}^3 / \text{días}$$

Este valor es esencial para la selección adecuada de la tecnología según el rango térmico de operación. Finalmente, los autores Appels et al. (2011); Gerardi (2003); Weiland (2010) indican que la degradación de la materia orgánica ocurre de manera progresiva, y el rendimiento óptimo de biogás se alcanza cuando se logra degradar entre el 40% y 60% del sustrato orgánico.

#### 4. Carga diaria (Cd)

**Datos:**

EF = Estiércol fresco (192 kg)

**Relación estiércol: agua = 1:3**

$$Cd = EF + (3 \times H^2O)$$

$$Cd = 192 + (192 \times 3)$$

$$Cd = 192 + 576$$

$$Cd = 768 \text{ kg/día} \approx 0.768 \text{ m}^3/\text{día}$$

#### 5. Volumen líquido del biodigestor (VI)

**Datos:**

Cd= 0,768m<sup>3</sup>/día

TRH= 35 días

$$VI = Cd \times TRH$$

$$VI = 0.768 \text{ m}^3/\text{día} \times 35 \text{ días}$$

$$VI = 26.9 \text{ m}^3 \approx 27 \text{ m}^3$$

#### 6. Volumen del biogás (Vg)

El volumen de almacenamiento de gas corresponde al 25% del volumen líquido (relación 3:1).

$$Vg = \frac{0.25}{0.75} \times VI$$

$$Vg = 0.33 \text{ m}^3 \times 27 \text{ m}^3$$

$$Vg = 9 \text{ m}^3$$

## 7. Volumen total del biodigestor (VTd)

### Datos:

**VI** = Volumen líquido útil (27 m<sup>3</sup>).

**Vg** = Volumen destinado a la campana o espacio de almacenamiento de gas (generalmente 10–20 % del VI).

$$Vtd = VI + Vg$$

$$Vtd = 27 \text{ m}^3 + 9 \text{ m}^3 =$$

$$Vtd = 36 \text{ m}^3$$

## 8. Tanques de carga y descarga de efluentes

Según Avendaño (2010), los tanques de carga y descarga deben tener dimensiones similares, ya que la cantidad que ingresa es la misma que debe salir. Estos datos son fuentes de información bibliográfica que se consideran para los cálculos de implementación del biodigestor en la Finca Lodana.

### 8.1. Volumen del tanque de carga y descarga:

$$Vte = 3 \times Cd$$

### Datos:

**Vte**: Volumen del tanque de efluentes (m<sup>3</sup>)

**Cd**: Carga diaria de efluentes (m<sup>3</sup>)

$$Vte = 3 \times 0.768 \text{ m}^3$$

$$Vte = 2.304 \text{ m}^3$$

## 8.2. Longitud del tanque de carga y descarga:

### Datos:

***hte*** = altura útil efectiva del tanque, que corresponde al volumen de fluido que se utiliza.

***Pd*** = profundidad total del tanque (altura interna desde el borde superior hasta el fondo).

***hb*** = altura de base, es decir, la parte del tanque que no se llena con fluido o que corresponde al nivel muerto (fondo que no participa en el llena/ descarga útil).

$$hte = pd - hb$$

$$hte = 1.2 \text{ m} - 0.50 \text{ m}$$

$$hte = 0.70 \text{ m}$$

## 9. Dependencia de la temperatura:

$$Gy(T, RT) = mGy \times f(T, RT)$$

### Datos:

$Gy(T, RT)$  = rendimiento de gas en función de la temperatura del digester y el tiempo de retención.

$mGy$  = rendimiento medio específico de gas, p. ej., contenido de sólidos volátiles l/kg. (0,22 m<sup>3</sup>/kg SV)

$f(T, RT)$  = multiplicador del rendimiento de gas en función de la temperatura del digester T y el tiempo de retención RT (mesofílico 20–45 °C, TRH = 35 días →  $f \approx 1$ ).

$$Gy(T, RT) = mGy \times f(T, RT)$$

$$Gy(T, TR) \approx 0,22 \times 1 = 0,22 \text{ m}^3/\text{kg SV}$$

## 10. Cálculo de biogás requerido

El potencial de producción de biogás se calcula en función de la fracción de sólidos volátiles (SV) de la materia prima y el rendimiento específico de metano:

$$PB = SV \times YCH_4$$

**Datos:**

**SV** = MPD × fracción de sólidos volátiles.

**Y(CH<sub>4</sub>)** = rendimiento de metano = 0,20 – 0,25 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg

**SV** = valor medio adoptado: 0,22 m<sup>3</sup>/kg SV.

- Fracciones SV adoptadas:
  - Bovinos: fSV=0,80
  - Cabras: fSV=0,75
- Rendimiento de metano:
  - YCH<sub>4</sub>=0,22 m<sup>3</sup>/kg SV

**11. Producción de metano (CH<sub>4</sub>) y biogás diario por tipo de animal**

- **Bovinos grandes**

**Cálculo de sólidos volátiles (SV):**

$$SV = 96 \times 0,80 = 76,8 \text{ kg SV/día}$$

**Producción de metano (CH<sub>4</sub>):**

$$P(CH_4) = SV \times YCH_4 = 76,8 \times 0,22$$

$$P(CH_4) = SV \times YCH_4 = 16,896 \approx 16,90 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$$

**Producción de biogás (PB):**

Producción total de biogás (60% CH<sub>4</sub>) = CH<sub>4</sub> / 0,60 = 28,16 m<sup>3</sup>/día

- **Bovinos medianos**

**Cálculo de sólidos volátiles (SV):**

$$SV = 66 \times 0,80 = 52,8 \text{ kg SV/día}$$

**Producción de metano (CH<sub>4</sub>):**

$$P(\text{CH}_4) = \text{SV} \times \text{YCH}_4 = 52,8 \times 0,22$$

$$P(\text{CH}_4) = \text{SV} \times \text{YCH}_4 = 11,616 \approx 11,62 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$$

**Producción de biogás (PB):**

Producción total de biogás (60% CH<sub>4</sub>) = CH<sub>4</sub> /0,60 = 19,36 m<sup>3</sup>/día

- Cabras

**Cálculo de sólidos volátiles (SV):**

$$\text{SV} = 30 \times 0,75 = 22,5 \text{ kg SV/día}$$

**Producción de metano (CH<sub>4</sub>):**

$$P(\text{CH}_4) = \text{SV} \times \text{YCH}_4 = 22,5 \times 0,22$$

$$P(\text{CH}_4) = \text{SV} \times \text{YCH}_4 = 4,95 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$$

**Producción de biogás (PB):**

Producción total de biogás (60% CH<sub>4</sub>) = CH<sub>4</sub> /0,60 = 8,25 m<sup>3</sup>/día

**12. Producción de biofertilizante**

El digestato resultante del biodigestor se puede aprovechar como biofertilizante líquido y sólido. La cantidad disponible es:

Digestato= Cd=768 kg/día

Se considera el contenido de sólidos totales (ST = 24.67%):

Biofertilizante sólido= Cd · (1-100%ST)

Biofertilizante sólido= 768 · (1-0.2467) = 577.3 kg/día ≈ 0,577 m<sup>3</sup>/día

**13. Factor de seguridad para almacenamiento de biogás.**

Para una mayor capacidad de almacenamiento de biogás se sobredimensionó el biodigestor en 6 % con respecto a su volumen de la cámara de digestión (28 m<sup>3</sup>).

$$\mathbf{Sab = Vtb * 6\%}$$

**Dónde:**

**Sab**= Sobredimensionamiento para almacenamiento de biogás.

El volumen del sobredimensionamiento para almacenamiento de biogás. (Sab) se indica a continuación.

$$\mathbf{Sab = 27,63 \text{ m}^3 \times 0,06}$$

$$\mathbf{Sab = 1,6578 \text{ m}^3}$$

$$\mathbf{Sab \approx 1,66 \text{ m}^3}$$

#### **14. Dimensionamiento del gasómetro:**

El tamaño del gasómetro, es decir, el volumen del gasómetro  $V_g$ , depende de las tasas relativas de generación y consumo de gas. El gasómetro debe estar diseñado para:

**Datos:**

Cubrir la tasa máxima de consumo  $g_{C_{max}}$  ( $\rightarrow V_{g1}$ ) și

Mantener el gas producido durante el período de consumo cero más largo  $t_{z_{max}}$  ( $\rightarrow V_{g2}$ )

**Fórmula=**

$$\mathbf{V_{g1} = g_{C_{max}} \times t_{C_{max}}}$$

$$\mathbf{V_{g1} = v_{C_{max}} \times V_g^2}$$

$$\mathbf{V_{g1} = G_h \times t_{z_{max}}}$$

$g_{C_{max}}$  = consumo máximo de gas por hora [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$t_{C_{max}}$  = tiempo de consumo máximo [h]

$v_{C_{max}}$  = consumo máximo de gas [ $\text{m}^3$ ]

$G_h$  = producción horaria de gas [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] =  $G \div 24 \text{ h/d}$

$t_{z_{max}}$  = tiempo máximo de consumo cero [h]

Vg-valor ( $V_{g1}$  o  $V_{g2}$ ) determina el tamaño del gasómetro. Se debe añadir un margen de seguridad del 10-20%:

$$Vg = \frac{1,15}{(\pm 0,5)} \times \frac{\text{máx}}{(V_{g1}, V_{g2})}$$

**Datos:**

**Margen de seguridad:** 15%  $\rightarrow$  1,15

**Producción diaria de biogás:**  $G = 33,47 \text{ m}^3/\text{día}$

Producción horaria de gas:

$$G_h = 24G = 2433,47 \approx 1,395 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{g1} = g_{cmax} \times t_{cmax} = 2 \times 5 = 10 \text{ m}^3$$

$$V_{g2} = G_h \times t_{zmax} = 1,395 \times 12 \approx 16,74 \text{ m}^3$$

$$V_{gbase} = \max(V_{g1}, V_{g2}) = \max(10, 16,74) = 16,74 \text{ m}^3$$

$$V_g = 1,15 \times V_{gbase}$$

$$V_g = 1,15 \times 16,74 \approx 19,25 \text{ m}^3$$

### 15. La relación volumen del digestor / volumen del gasómetro ( $V_d/V_g$ )

La relación ( $V_d / V_g$ ) es un factor importante con respecto al diseño básico de la planta de biogás. Para una planta de biogás agrícola típica, la  $V_d/V_g$ -la proporción oscila entre 3:1 y 10:1, siendo 5:1 - 6:1 el que ocurre con mayor frecuencia (Energypedia 2015).

En función de la caracterización de la finca objeto de estudio, ubicada en la parroquia Lodana, se determinó la disponibilidad real de materia orgánica a partir de la población ganadera existente. Se contabilizaron seis bovinos (tres de talla grande y tres de talla media), así como doce caprinos, lo cual constituye la base primaria de abastecimiento del sistema.

De acuerdo con la literatura técnica, un bovino adulto de gran tamaño produce en promedio entre 30 y 35 kg de estiércol fresco por día (EPA 2004; Lombo et al. 2022), mientras que los bovinos medianos generan entre 20 y 25 kg/día (Rojas 2017). En el caso de los caprinos, la excreción diaria oscila entre 2 y 3 kg (Guerrero 2019; FAO 2021). Bajo estos parámetros, el total de estiércol disponible en la finca corresponde a 192 kg/día, cifra que incluye 96 kg/día de bovinos grandes, 66 kg/día de bovinos medianos y 30 kg/día de caprinos.

Para la preparación del sustrato a digerir, se consideró una relación estiércol: agua de 1:3, recomendada para sistemas de biodigestión en zonas tropicales (FAO 2005; Energypedia 2015). Esta dilución arrojó una carga diaria de 0,768 m<sup>3</sup>/día de mezcla. Asimismo, y en concordancia con la literatura especializada, se adoptó un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 35 m<sup>3</sup>/días, adecuado para condiciones mesofílicas (25–30 °C) (Weiland 2010; Appels et al. 2008).

Con estos valores, el volumen líquido útil del biodigestor (VI) resultó de 27 m<sup>3</sup>, mientras que el volumen de almacenamiento de gas (Vg), equivalente al 25 % del volumen líquido, se estimó en 9 m<sup>3</sup>. Por tanto, el volumen total de diseño (VTd) del biodigestor tipo Taiwán requerido para la finca es de 36 m<sup>3</sup>.

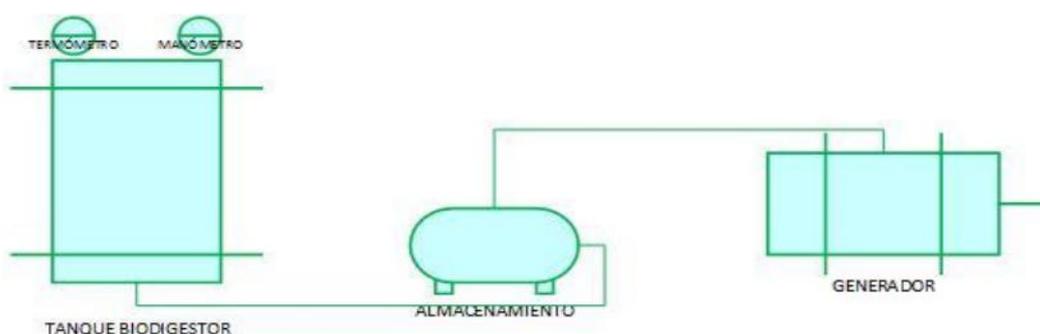
Respecto a la producción de biogás, considerando una concentración de sólidos volátiles del 17 % en el estiércol fresco (Rojas 2017) y una producción específica de metano de 0,22 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV (Appels et al. 2008; Weiland 2010), se calculó una generación potencial de 7,2 m<sup>3</sup>/día de biogás. Esta producción es suficiente para cubrir necesidades energéticas básicas en el ámbito doméstico (cocción de alimentos y calentamiento de agua), además de reducir la dependencia de combustibles fósiles y minimizar la contaminación derivada de la disposición inadecuada de excretas.

De manera complementaria, el sistema producirá un volumen aproximado de 768 kg/día de digestato líquido y sólido, el cual puede ser reincorporado a la finca como biofertilizante orgánico, contribuyendo al cierre de ciclos productivos y a la sostenibilidad agropecuaria. En síntesis, los resultados confirman la viabilidad técnica de la implementación de un biodigestor tipo Taiwán de 36 m<sup>3</sup> de capacidad, adaptado a la disponibilidad de biomasa en la finca de estudio, con

un rendimiento estimado de 7 m<sup>3</sup>/día de biogás y una producción significativa de biofertilizante. Por lo tanto, el digestato puede utilizarse integralmente como fertilizante, contribuyendo a la fertilización de cultivos en la finca.

#### 4.1.2.4. Esquema

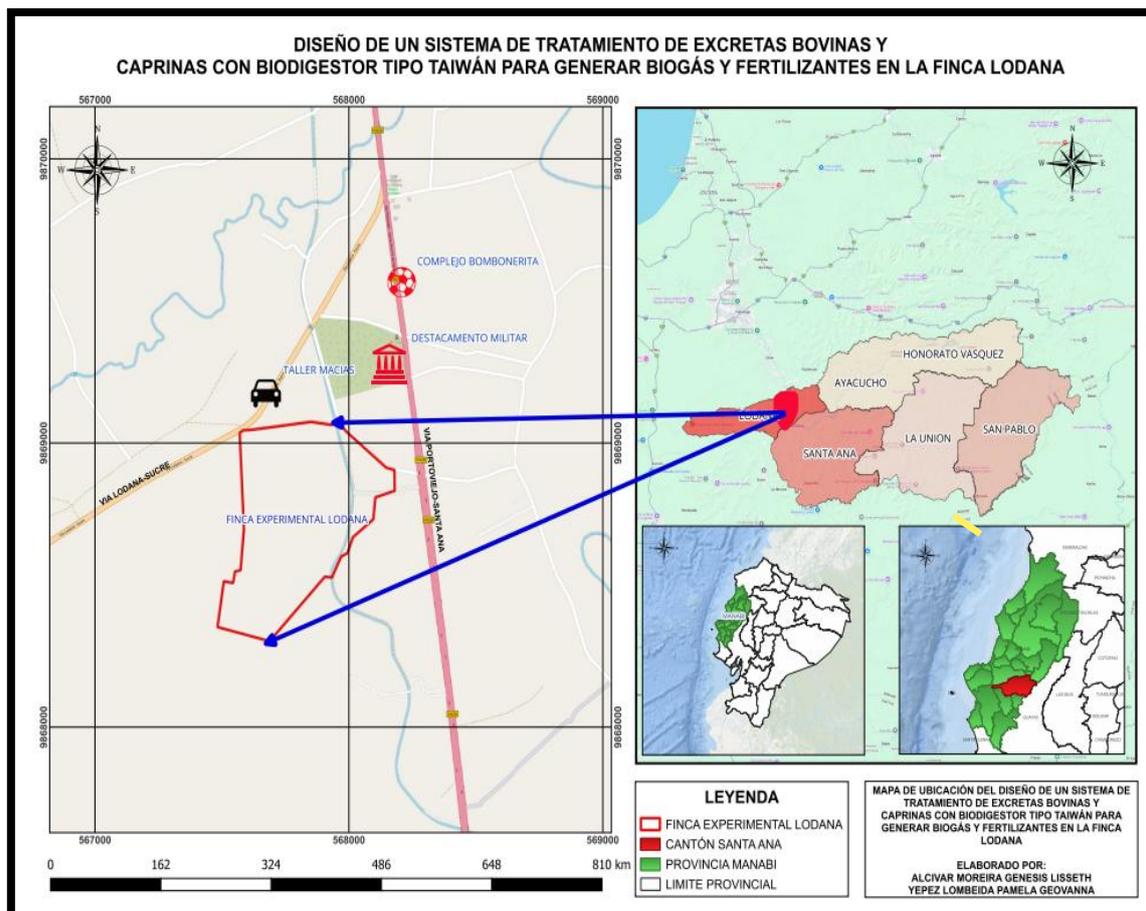
Según Zambrano (2020) en el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias menciona que el biodigestor debe contener el siguiente esquema: el biodigestor contará con el tanque de alimentación o premezcla del biodigestor de 55 galones se procede a llenar con los desechos agrícolas generados en la finca de los productores, empezando con las excretas (9 kg), seguido de 20 kg de desechos como la cáscara de yuca y finalizando con 72 litros de agua. Una vez que se ha completado el llenado, se procede con el montaje del reactor e instalación de las tuberías de presión, asegurando las uniones correspondientes. Es importante colocar un manómetro antes de realizar los chiflones con el que se podrá medir este parámetro diariamente, además se debe colocar una llave de paso para desaguarlos.



**Imagen 2.** Diagrama de proceso de obtención de biogás a partir de desechos agrícolas.

#### 4.1.2.5. Ubicación

En el presente proyecto de investigación, se va a considerar implementar a la Finca Experimental de Lodana, la cual cuenta con un total de 17 hectáreas y está ubicada en la parroquia urbana del mismo nombre, correspondiente el cantón Santa Ana, provincia de Manabí. De forma más específica se encuentra en las siguientes coordenadas: al este 570284,45 y al oeste 9867206,08. Limita al norte con la vía que lleva al cantón 24 de Mayo y con las demás puntos cardinales (ULEAM 2021).



**Imagen 3. Ubicación de la Finca Experimental Lodana - ULEAM.**

#### **4.1.2.6. Materiales para biodigestor**

Para la propuesta de construcción y equipamiento del sistema, se contempla la adquisición de un tanque de 300 litros de plástico con agitador de aspas y con cadenas o engranajes, motor eléctrico de 1 Hp 110 v/220 v, 10 tubos de 110 mm x 3 mts, acoples Y de 4"x4" codo de 4" T de 4"x2", 2 llaves de paso de 4", 3 tubos de ½" plásticos para conducción de gas y 2 llaves de ½" roscables. Además, se implementan 20 correas tipo G de 1.5 mm x 6 mts, 10 tejas española de 5 mts, 10 cubreros de tejas, 5 varillas de Hierro de 10 mm para columnas y 12 mts de geomembrana 1.5 mm.

**4.1.2.7. Presupuesto total de accesorios y trabajos para biodigestor Lodana, ULEAM**

**Tabla 7.**

*Presupuesto total de accesorios y mano de obra*

Descripción	Cantidad / Tiempo	Precio Unitario (USD)	Subtotal (USD)
<b>Materiales</b>			
Tanque de 300 litros de plástico con agitador de aspas y con cadenas o engranajes	1	350,00	350,00
Motor eléctrico de 1 Hp 110 v/220 v	1	140,00	140,00
10 tubos de 110 mm x 3 mts	10	11,00	110,00
Acoples Y de 4"x4", codo de 4", T de 4"x2"	1 set	32,00	32,00
2 llaves de paso de 4"	2	30,00	60,00
3 tubos de ½" plásticos para conducción de gas	3	18,00	54,00
2 llaves de ½" roscables	2	10,00	20,00
Biodigestor	8,8 m	1	450,00
<b>Subtotal materiales</b>			<b>1216,00</b>
<b>Mano de obra estimada</b>			
Montaje del tanque y agitador	2 personas x 1 día	25,00 / persona	50,00
Instalación del motor eléctrico	1 persona x 0,5 días	25,00 / persona	12,50
Instalación de tuberías y acoples	2 personas x 1 día	25,00 / persona	50,00
Pruebas y ajuste del sistema	1 persona x 0,5 días	25,00 / persona	12,50
<b>Subtotal mano de obra</b>			<b>125,00</b>
<b>Costo total final</b>			<b>1341,00</b>

**Fuente:** Elaboración propia

El presupuesto consolidado incluye tanto los materiales como la mano de obra estimada para la construcción e instalación del biodigestor experimental. Este desglose permite una mejor planificación de recursos y facilita la asignación de costos, garantizando la transparencia y el control económico del proyecto. Se recomienda considerar además gastos indirectos como transporte, herramientas menores y posibles imprevistos para un presupuesto aún más preciso.

**Tabla 8.**

*Materiales para cubierta del biodigestor*

<b>Descripción de materiales</b>	<b>P / Unitario</b>	<b>Subtotal</b>
20 correas tipo G de 1.5 mm x 6 mts	\$ 9,85	\$ 197,00
10 tejas española de 5 mts	\$ 50,00	\$ 500,00
10 cumbreros de tejas	\$ 10,60	\$ 107,00
5 varillas de hierro de 10 mm para columnas	\$ 8,00	\$ 40,00
12 mts de geomembrana 1.5 mm	\$ 10,00	\$ 120,00
<b>Subtotal: \$ 1.890,00</b>		
<b>Proforma del Biodigestor: \$ 3.565,00</b>		
<b>Costo Total del proyecto: \$ 5.455,00</b>		

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 9.**

*Datos calculados para la producción de biogás y biofertilizante*

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Cantidad de estiércol diario (CE)</b>	192	kg/día	3 bovinos grandes, 3 medianos, 12 cabras
<b>Carga diaria de mezcla (Cd)</b>	768	kg/día ≈ 0.768 m <sup>3</sup> /día	Relación estiércol:agua = 1:3
<b>Tiempo de retención hidráulica (TRH)</b>	35	días	Valor de diseño adoptado (mesofílico)
<b>Volumen líquido del biodigestor (VI)</b>	27	m <sup>3</sup>	Cd × TRH

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Volumen de biogás (Vg)</b>	9	m <sup>3</sup>	25% del volumen líquido
<b>Volumen total del biodigestor (VTd)</b>	36	m <sup>3</sup>	VI + Vg
<b>Producción diaria estimada de biogás (PB)</b>	7	m <sup>3</sup> /día	Según sólidos volátiles y rendimiento específico
<b>Volumen del tanque de carga/descarga (Vte)</b>	2.304	m <sup>3</sup>	3 × Cd
<b>Altura útil del tanque de carga/descarga (hte)</b>	0.50	m	Diferencia entre profundidad total y altura base
<b>Cantidad de biogás requerido para cocina</b>	1.11	m <sup>3</sup> /día	Equivalente a 1 tanque de GLP/mes
<b>Digestato disponible</b>	768	kg/día	Aprovechable como biofertilizante líquido y sólido
<b>Biofertilizante sólido estimado</b>	577.3	kg/día	Considerando 24.67% de sólidos totales

**Fuente:** Elaboración propia

### **4.1.3. Manual de manejo y mantenimiento del biodigestor tipo Taiwán, orientado a la producción sostenible de biogás y fertilizantes orgánicos.**

#### **4.1.3.1 Introducción**

Ecuador, al ser un país con gran potencial en la producción de agricultura y ganadería, tenemos cuantiosas cantidades de desechos (biomasa) que se pueden utilizar para producir energías alternativas. Sin embargo, el uso de biogás para la generación de electricidad no es una tecnología muy extendida en nuestro barrio (Durazno 2018). De acuerdo a Kummamuru (2016), la biomasa cumple actualmente con el 14% de la demanda mundial de energía, pero la utilizamos de un modo ineficiente, sin haber extraído todo su potencial.

El Ministerio de Agricultura y Ganadería informa que en el país se generan a diario considerables cantidades de desechos, los cuales en la mayoría de los casos son incinerados, abandonados en el lugar de origen o liberados en ríos, lo cual constituye un grave problema de contaminación para los ecosistemas debido a que su estructura lignocelulósica le confiere lenta biodegradación (Cueva 2018).

En consecuencia, este manual tiene como propósito brindar guías claras para la población dedicada al manejo y cuidado de un biodigestor tipo Taiwán. El cual, a través de este proceso, promueve una producción más sustentable de biogás y bio abonos. La transformación de los desechos orgánicos, como el estiércol de diferentes animales, en energía renovable y bio abonos, fomenta la economía circular y contribuye a la economía circular y la mitigación de impactos ambientales.

La generación de biogás es un proceso biológico en el que participan diversos organismos encargados de descomponer diferentes desechos orgánicos, como restos de comida, estiércol y desechos industriales, entre otros; en la ausencia de oxígeno. Este desglose puede ocurrir de manera natural o en reactores herméticos, que dan como resultado biogás, compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y, en rangos muy bajos, otros gases,

como el sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), que es tóxico.

La fertilización es un proceso importante en la producción de forraje y puede ser orgánico o inorgánico, haciendo hincapié en que dicha práctica es crucial para sustituir los nutrientes necesarios para el crecimiento del pasto. No obstante, la efectividad de los fertilizantes inorgánicos se ve reducida en múltiples factores, los cuales influyen en la lixiviación, y volatización del nitrógeno. Aunque los fertilizantes inorgánicos han sido utilizados durante años, Botero sostiene que su baja eficiencia y sobredosis emitidas han provocado un impacto ambiental (González 2019).

#### 4.1.3.2 Descripción del biodigestor tipo Taiwán

El biodigestor de tipo Taiwán es una estructura tubular con revestimiento de plástico, polietileno de baja densidad, construido sobre una zanja en el suelo. Está diseñado para operar de manera semi continua con una mezcla de estiércol: agua en proporción 1:3. La estructura tubular conocida como biodigestor está formada por componente principal o biosfera, entrada de alimentación o carga de mezcla, salida de digestato o efluente, campana de gas o cúpula-flexible, Válvula de salida de biogás, trampa de agua a la salida para eliminar impurezas.

**Tabla 10.**

#### *Especificaciones Técnicas*

Capacidad	Número de usuarios según su consumo diario de agua**	Número de usuarios				
		A	B	C	D	E
	150 l./usuario	90	40			
		l./usuario	l./usuario			
<b>600 l.</b>	4	7	15	0.88	1.63	1.07
<b>1300 l.</b>	9	14	33	1.15	1.96	1.27
<b>3000 l.</b>	20	33	75	1.46	2.75	1.77
<b>7000 l.</b>	47	78	175	2.42	2.83	1.37

*Notas.* El número de usuarios variará de acuerdo a su consumo diario de agua, para lo cual Rotoplas brindará asesoría técnica. Referencialmente el consumo diario de agua de una persona en zona urbana es de 150 litros, en zona periurbana y/o rural es de 90 litros y en zona rural y/o AA.HH. es de 40 litros. **Fuente:** Rotoplas 2021.

## Tamaño de la zanja

El tamaño de la zanja dependerá de las dimensiones del biodigestor, específicamente su longitud y diámetro. Según Martí Herrero (2008), se pueden considerar las siguientes dimensiones de referencia para la zanja, dependiendo del diámetro del biodigestor:

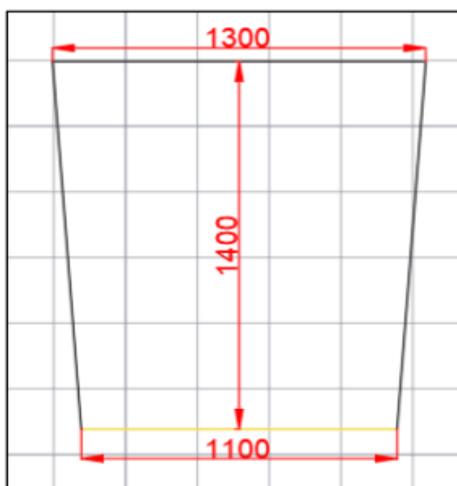
**Tabla 11.**

*Dimensiones de la zanja*

<b>Diámetro (d) (m)</b>	<b>1.28</b>	<b>1.43</b>	<b>1.59</b>	<b>1.75</b>	<b>2.00</b>
a (m)	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
b (m)	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
p (m)	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4

**Fuente:** Martí Herrero 2008

Para la finca se consideró un diámetro de aproximadamente 2 metros para el biodigestor, aplicando las medidas sugeridas correspondientes a ese tamaño. Así, las proporciones de la zanja son las que están indicadas en la tabla 11 para el diámetro mencionado de 2 metros, como se presenta a continuación:

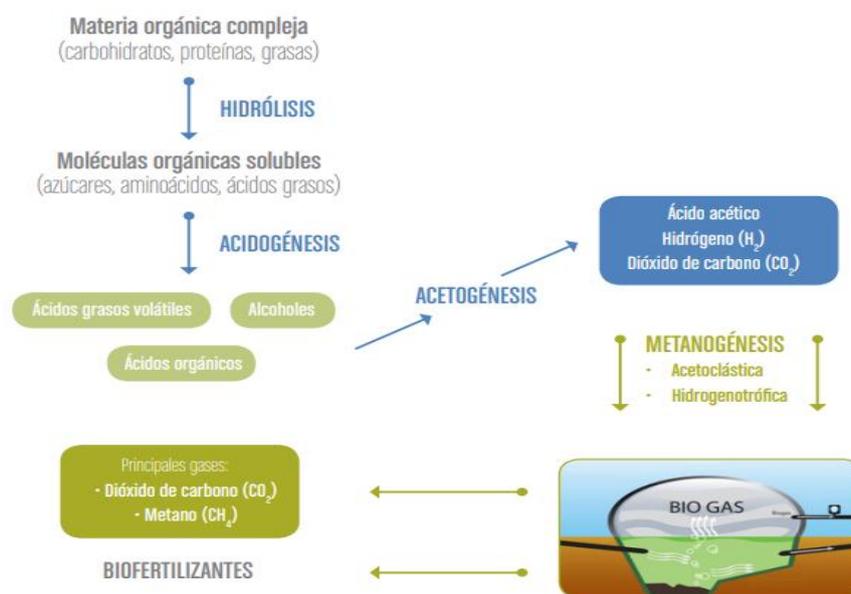


**Figura 1.** Medidas de la zanja del biodigestor en mm.

**Fuente:** Yáñez 2023

La adecuación de la zanja es fundamental para el funcionamiento y la duración del biodigestor. Debe contar con las dimensiones correctas y sus paredes y suelos deben estar pulidos para proteger la estructura del biodigestor. Los pozos de inspección están hechos de concreto y bloques, y las tuberías son de PVC de 4 pulgadas. Es esencial separar el biodigestor del terreno, por lo que se utiliza aserrín y plástico en toda la zona de la zanja.

También es necesario controlar la salida de biogás, por lo que se instala una válvula esférica de paso. Se revisan todas las instalaciones y la ubicación del biodigestor antes de realizar la primera carga y dar inicio al proceso de digestión, que permite que la mezcla de agua y estiércol de los cubículos de los cerdos entre. Para agregar el cebador, se utilizan 20 litros el primer día y otros 20 litros tres días después. La generación de biogás comienza, haciendo que este ocupe la parte superior de la bolsa, y su volumen aumenta, expandiendo el biodigestor hasta alcanzar su capacidad máxima. Por motivos de seguridad, antes de utilizar el biogás, se debe dejar escapar la primera producción del mismo.



**Imagen 4.** Etapas de la digestión anaeróbica en un biodigestor, con producción de biogás y biofertilizante. **Fuente:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - ONU 2019.

El proceso de digestión anaeróbica se divide en tres etapas principales, aunque en los biodigestores estas ocurren de forma simultánea:

- **Hidrólisis:** La materia orgánica compleja (como carbohidratos, proteínas y lípidos) se descompone en compuestos solubles más simples (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos), los cuales sirven de base para las siguientes reacciones.
- **Acidogénesis y acetogénesis:** los microorganismos especializados convierten estos compuestos solubles de hidrógeno ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y acetato. Este paso es rápido y se verifica para evitar una reducción excesiva de pH, lo que puede afectar el sistema microbiano.
- **Metanogénesis:** los microorganismos metanogénicos convierten acetato en metano ( $CH_4$ ) y  $CO_2$  o producen  $CH_4$  de  $H_2$  y  $CO_2$ .

Comprender estos conceptos físicos y biológicos es esencial para mejorar la efectividad de los degradadores biológicos. La forma en que funciona el digester es similar al sistema digestivo con animales rumiantes con hidrólisis, acidogénesis y procesos de acetogénesis. Las vigas ayudan a los microorganismos que se adaptan al pH y las variaciones de temperatura durante la digestión, mientras que los tejidos especializados perciben ácidos grasos temporales.

La materia orgánica, en su mayoría composta por estiércol de vacas y cerdos, se combinará con agua en la proporción correcta y se añadirá al biodigestor de manera diaria. El proceso de fermentación anaeróbica ocurrirá en tres etapas: hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis. Las bacterias que se encuentran en el estiércol descomponen la materia orgánica, generando biogás que consiste principalmente en metano y un biofertilizante con abundantes nutrientes, el cual se aplicará en los cultivos de la granja (Alva 2023).

### 4.1.3.3 Operación y manejo (Parámetros físico-químicos de control)

#### Procedimiento de operación

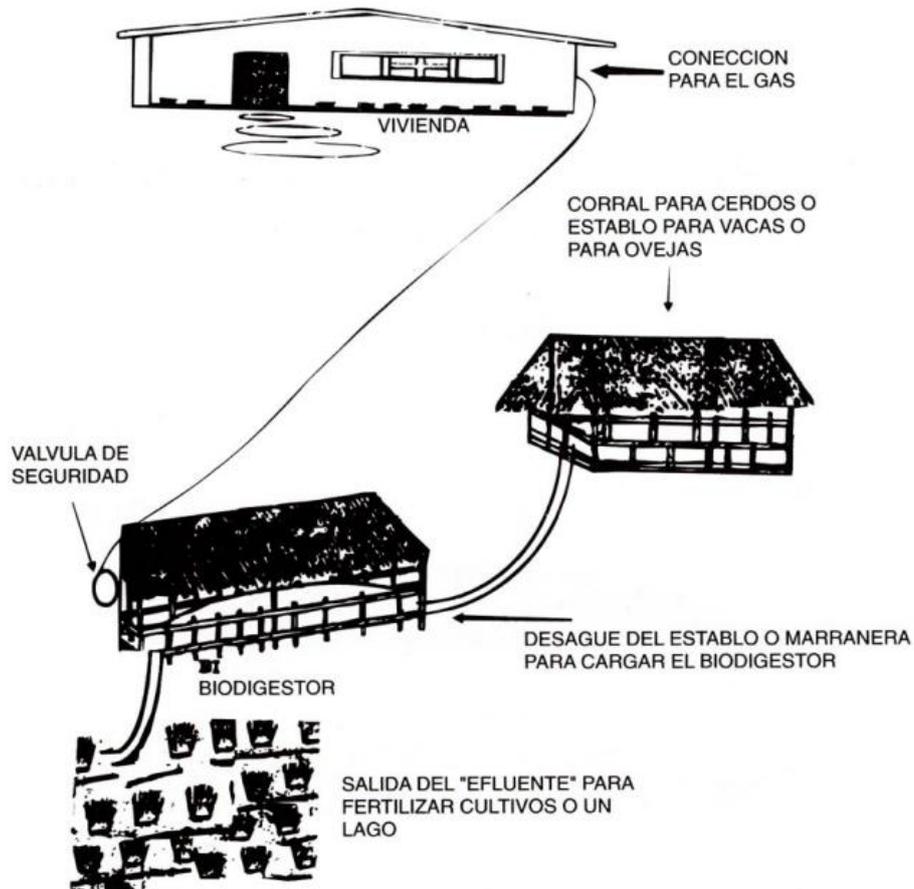


FIGURA 2. ¿DONDE INSTALAR EL BIODIGESTOR?

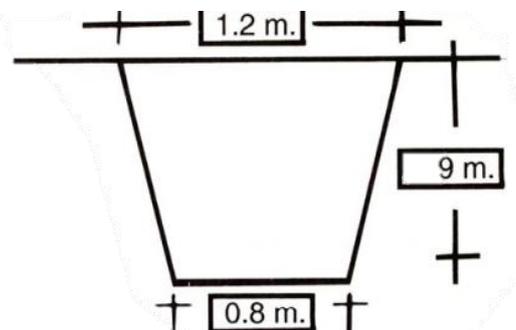


FIGURA 3. HUECO PARA LA INSTALACION DEL BIODIGESTOR

### Preparación de la mezcla (sustrato)

1. Recolectar estiércol fresco de bovinos y/o caprinos.
2. Mezclar el estiércol con agua en una proporción de 1:3 (estiércol: agua), formando una mezcla homogénea.
3. Asegurarse de que la mezcla no contenga piedras, restos metálicos u objetos sólidos grandes que puedan dañar el biodigestor.

### Tanque

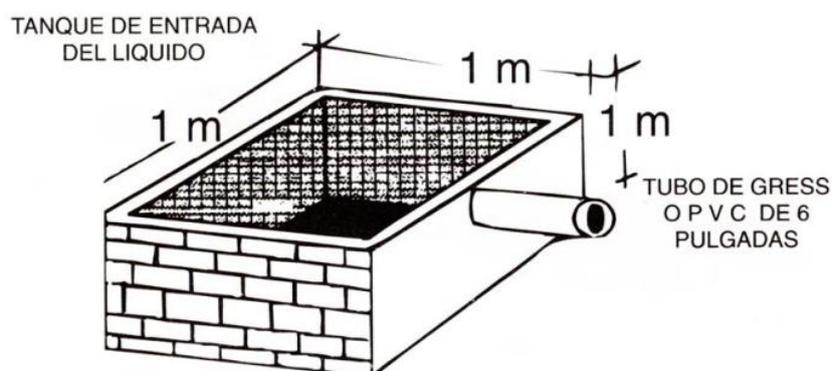


FIGURA 4. TANQUE

En cada uno de los extremos de la fosa se construye un tanque:

1. Uno es el tanque de carga por donde entra todos los días la cantidad de agua y estiércol que el biodigestor necesita para funcionar.
2. En el otro extremo se construye el otro tanque donde se acumula lo que va saliendo del digestor.
3. Se recomienda que los tanques tengan un metro de ancho, un metro de largo y un metro de profundidad. Es importante tener en cuenta que el tanque de carga debe tener un nivel más alto que el tanque de salida.

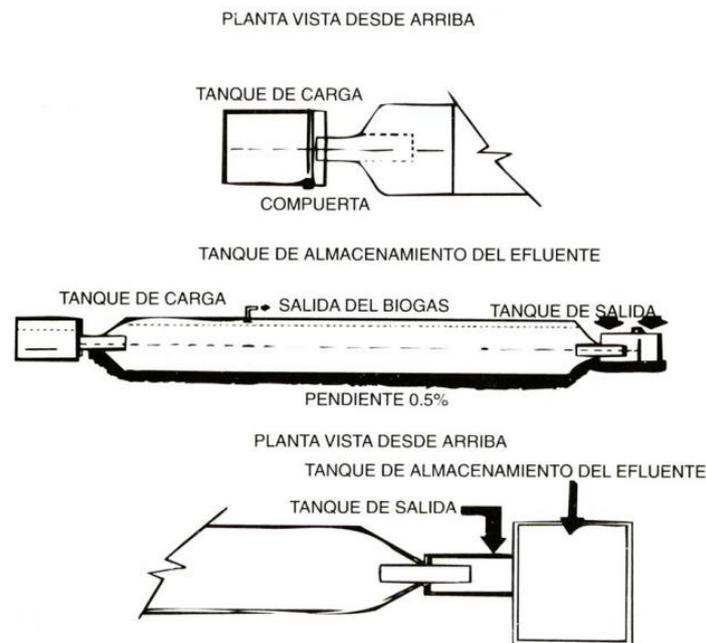
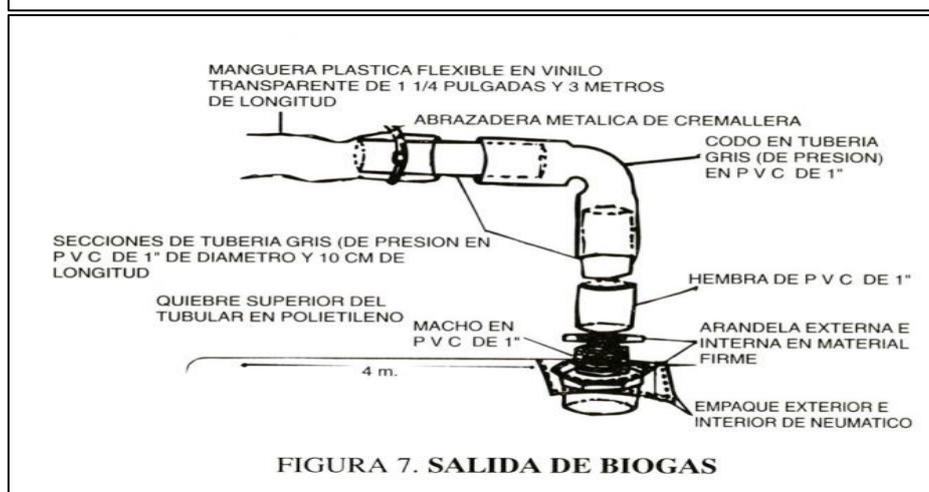
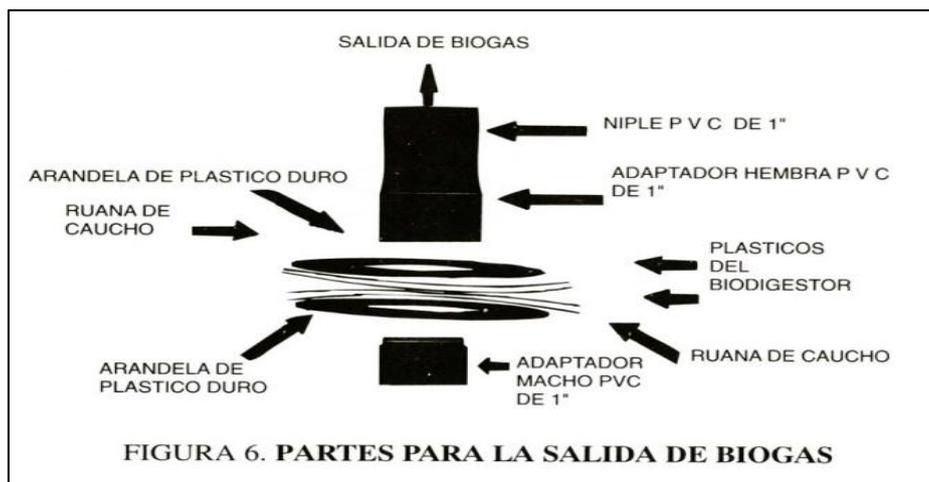


FIGURA 5. TANQUES Y ESQUEMA DEL DIGESTOR

### Colocación de la salida para el biogás

Sobre la parte superior de la bolsa a unos 4 metros de cualquiera de los extremos y centrado sobre el quiebre del tubular se pega una arandela de caucho; de la misma forma se hace por dentro en el plástico interno; estas arandelas deben coincidir, luego se perforan las bolsas (agujero). Posteriormente, se introduce entonces de dentro hacia afuera de la bolsa la rosca del macho PVC de una pulgada a la cual se le han insertado previamente, y en orden, arandela de plástico duro (puede ser PVC) posteriormente el segundo empaque o ruana de neumático, luego los dos plásticos del digestor con el primer empaque o ruana de neumático externo, se le inserta la arandela de plástico duro y se procede a enroscar la hembra PVC de una pulgada sobre la rosca del macho PVC, también de una pulgada dándole el mayor ajuste manual posible, luego se pega el niple PVC de una pulgada.

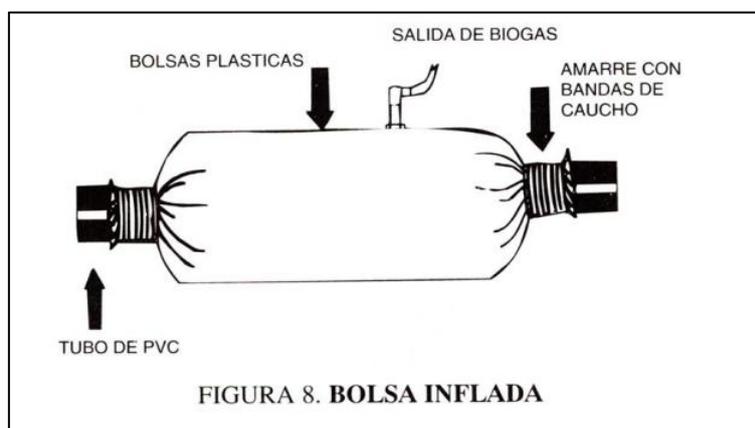


### Carga del biodigestor

Verter la mezcla en la cámara de entrada del biodigestor.

Evitar la sobrecarga para no afectar la producción de biogás ni la fermentación.

Registrar la cantidad de sustrato ingresado diariamente.



### **Instalación y funcionamiento de la válvula de seguridad**

La válvula está constituida por una garrafa plástica de 3 a 5 litros de capacidad; sobre la boca destapada de esta garrafa se coloca una te en PVC de 1 pulgada. En el extremo de la te dirigido dentro de la garrafa se introduce y pega una reducción en PVC de 1 a 2 pulgadas (buje) que a su vez se acopla y pega a una sección de 25 cm de tubo PVC de 2 pulgadas cuyo extremo inferior debe penetrar 10 cm dentro del agua contenida en la garrafa. El nivel del agua de la garrafa se mantiene aún bajo la lluvia mediante huecos alineados en redondo y a la mitad de la altura de las paredes de la garrafa.



### **Dispositivos para poder utilizar el biogás**

#### **Tubería de conducción y distribución del biogás**

Se recomienda utilizar tubería de PVC de 1, 4 o 2 pulgadas o manguera plástica de la misma dimensión, la cual debe ir por el aire con el fin de drenar el agua que se pueda condensar dentro de la tubería.

#### **Trampa de condensado**

Uno de los componentes del biogás es el vapor de agua que puede estar presente en cantidades más o menos apreciables. Cuando el biogás sale del digester a través de la tubería de conducción se somete a una disminución de la temperatura, ocasionando la condensación de la humedad, fenómeno que puede obstruir la tubería. Una solución a este problema consiste en colocar la tubería de conducción con una inclinación hacia el digester buscando con ello que el

agua fluya de regreso, esto se hace cuando la longitud de la tubería es muy grande.

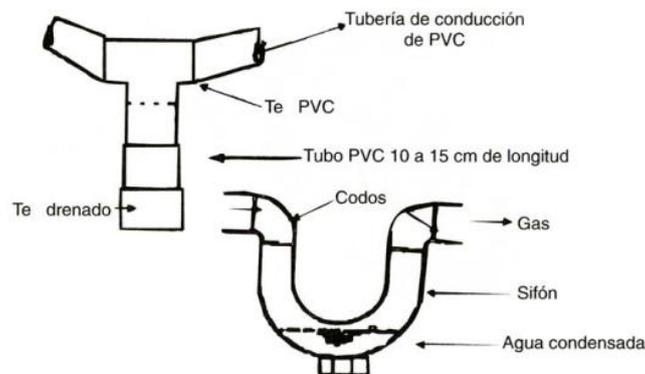


FIGURA 10. TRAMPA DE CONDENSADO

### Trampa de ácido sulfhídrico (HS)

El ácido sulfhídrico es un componente del biogás con un olor característico a huevo podrido que es molesto para la persona que se expone continuamente a él ya que paraliza el nervio olfativo, produce dolor de cabeza, ardor en los ojos y pérdida de la visión. Cuando se utiliza el biogás como combustible para motores el  $H_2S$  reacciona con el oxígeno (O) y con el vapor de agua produciendo ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) lo cual puede causar daños internos en el motor. Entre los métodos de separación del  $H_2S$  el más utilizado es el denominado "método de caja seca" que consiste en el uso de viruta de hierro dentro de un recipiente por el que se hace pasar biogás.

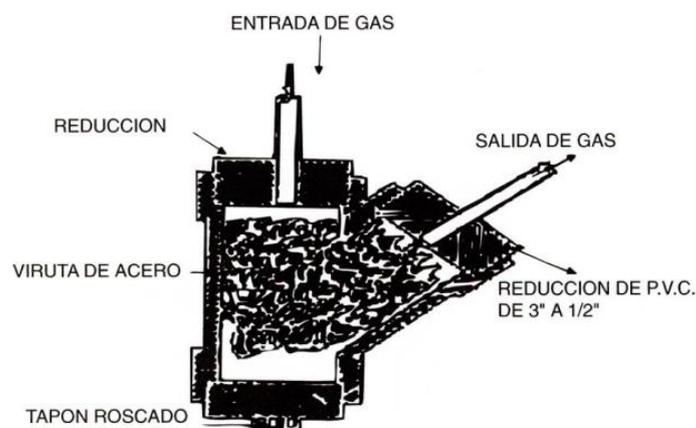


FIGURA 11. TRAMPA DE ACIDO SULFHIDRICO  $H_2S$

## Quemadores del fogón

El fogón es la última parte de la instalación que conduce el biogás y consiste en instalar quemadores que permitan la cocción de los alimentos; estos quemadores pueden ser de varias formas según las necesidades de cada unidad familiar.

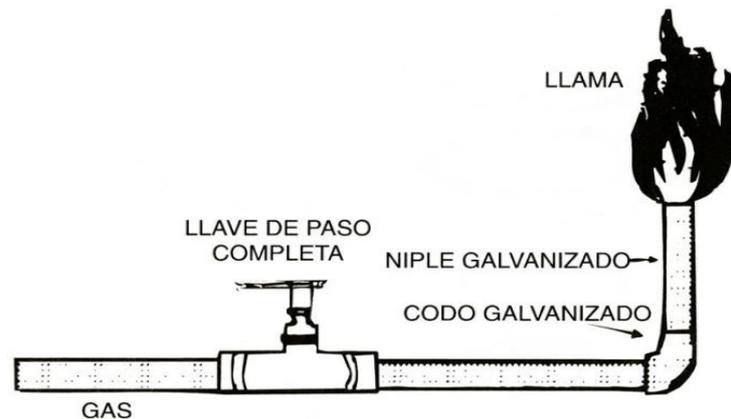


FIGURA 12. QUEMADOR EN TUBO

## Control de temperatura y pH

1. Mantener la temperatura de operación entre 25–35 °C, ideal para la actividad microbiana.
2. Monitorear el pH semanalmente, procurando valores entre 6.8–7.5 para un óptimo rendimiento.
3. Ajustar con cal o ácido cítrico si el pH se desvía de este rango.

## Extracción del biogás

1. Conectar el sistema de tuberías al quemador, cocina o generador de energía.
2. Liberar biogás de manera controlada, evitando sobrepresión que pueda dañar la cubierta.
3. Revisar regularmente las válvulas y mangueras para detectar fugas.

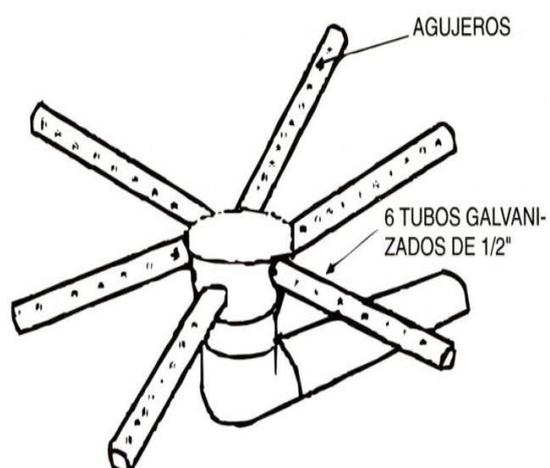


FIGURA 13. QUEMADOR ESTRELLA



FIGURA 14. QUEMADOR CAMPANA

### Recolección de fertilizante orgánico

1. Retirar el digestato líquido de la cámara de salida, filtrándolo si es necesario.
2. Aplicar como fertilizante líquido o sólido en cultivos, cumpliendo las recomendaciones agronómicas locales.

### Tabla 12.

#### Seguimiento de indicadores

Indicador	Frecuencia	Instrumento sugerido
pH	Semanal	Papel indicador o medidor digital
Volumen de gas	Diario	Medidor de presión o bolsa flexible
Temperatura	Diario	Termómetro ambiental

**Fuente:** Alva 2023.

### Alimentación del biodigestor

- Mezclar estiércol fresco con agua en relación 1:3.
- Verter la mezcla por la entrada de carga diariamente o de forma regular.

### **Condiciones óptimas**

- Temperatura: 30°C a 38°C (ideal para bacterias metanogénicas).
- pH: entre 6.8 y 7.4.
- Relación C/N: entre 20:1 y 30:1.

### **Parámetros físico-químicos de control**

Existen diversos análisis físico-químicos aplicables tanto a los sustratos como al contenido del biodigestor, que permiten evaluar su desempeño y estimar su rendimiento potencial. A continuación, se resumen los factores clave que influyen directamente en su funcionamiento:

- pH: indispensable para el equilibrio del sistema, al ser directamente influenciado por los microorganismos metanogénicos responsables de la producción de metano. Se encuentra en el rango de 7,0 a 7,8 pH (Babae y Shayegan 2011). El cambio de la mezcla de entrada o procesos internos, como el caso de la acidosis, puede variarlo, por lo que es necesaria la vigilancia para que no disminuya a niveles que inhiban la producción de biogás.
- Potencial redox: indica el grado de reducción del medio. Para el desarrollo adecuado de los microorganismos metanogénicos debe estar entre -370 y -220 mV.
- Temperatura: el factor esencial para que el proceso sea eficiente influye en la actividad microbiológica y de las reacciones bioquímicas. Su monitoreo garantiza un ambiente dentro del biodigestor.

El tiempo de Retención Hidráulico (TRH), se calcula como se designa por el volumen útil del reactor entre el caudal que ingresa diario. es un factor importante a tener en cuenta en el diseño. Además, el TRH se asocia estrechamente con la temperatura de funcionamiento: en condiciones psicrófilas (45 °C), es de 15 a 25 días y disminuye con un aumento de la temperatura debido a la aceleración de

la descomposición de la materia orgánica (Appels et al. 2011; Gerardi 2003; Weiland 2010). Para calcular el volumen útil de biodigestor en el marco del conocimiento de la tasa diaria de alimentación y el TRH, es posible usar la fórmula:

$$\text{TRH (días)} \times \text{Caudal diario (m}^3\text{/día)} = \text{Volumen útil (m}^3\text{)}$$

Este aspecto es fundamental para elegir la tecnología apropiada de acuerdo con el rango de temperatura de operación. Los biodigestores que operan de forma continua o semicontinua conservan un volumen estable, liberando una cantidad similar a la que se recibe cada día. La descomposición de la materia orgánica sucede de forma gradual, y la producción ideal de biogás se logra cuando se descompone entre el 40% y el 60% del material orgánico (Appels et al. 2011; Weiland 2010).

#### **4.1.3.4 Mantenimiento del biodigestor**

Los controles básicos que deben tener la consideración del usuario son: la integridad estructural, la verificación periódica de la ausencia de rupturas, agujeros o fujo de substrato líquido o gaseoso; los parámetros operativos, es decir, la temperatura, el pH, la frecuencia y volumen de carga y la producción de biogás con los cuales evaluar el rendimiento y detectar daños tempranamente: los sistemas de seguridad, comprobación de que las válvulas de venteo estén suficientemente sumergidas en agua para evitar fugas (Varnero 2011).

En plantas industriales existen sensores automatizados para ello, mientras en sistemas domésticos es común la fluctuación por evaporación; la condensación: en el caso de instalaciones domésticas, la acumulación de agua en las tuberías puede obstruir el paso del biogás y aumentar la presión en el sistema; las membranas, revisión de que ninguna de ellas estén en contacto con objetos cortantes o en condiciones que las puedan deteriorar; el dióxido de azufre, es conveniente colocar sensores o enviar pruebas de laboratorio de la presencia de este gas y de forma alternativa conocer el estado de los filtros (Varnero 2011).

Mantenimiento preventivo: revisar las válvulas, las tuberías y la trampa de agua del biodigestor de forma semanal, se debe verificar si hay posibles fugas en la membrana y dar mantenimiento del área de carga y descarga.

Mantenimiento correctivo. reparar de manera inmediata las fugas de gas o de líquido, también sustituir los tramos dañados de los tubos o de las conexiones y controlar si hay obstrucciones en la salida del digestato.

**Tabla 13.**

*Mantenimiento preventivo y correctivo*

<b>Actividad</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Descripción</b>
<b>Revisión de la cubierta flexible</b>	Semanal	Inspeccionar fugas, fisuras o desgaste.
<b>Limpieza de la entrada y salida de sustrato</b>	Mensual	Retirar restos sólidos que puedan obstruir el flujo.
<b>Monitoreo de temperatura y pH</b>	Semanal	Ajustar condiciones según registros.
<b>Inspección de válvulas y tuberías</b>	Mensual	Detectar y reparar fugas.
<b>Vaciado del digestato sólido</b>	Trimestral	Evitar acumulación excesiva y mantener la eficiencia.
<b>Revisión estructural</b>	Semestral	Verificar integridad de muros y base del biodigestor.

**Fuente:** Elaboración Propia

#### **4.1.3.5 Seguridad y Buenas Prácticas**

Durante la operación y mantenimiento del biodigestor, es fundamental garantizar la seguridad y minimizar riesgos. Para ello, el personal debe usar equipo de protección personal, incluyendo guantes, botas y mascarilla, especialmente durante la manipulación de estiércol y digestato. Se debe evitar la inhalación directa de biogás concentrado, trabajar en áreas ventiladas y prevenir derrames de digestato para evitar la contaminación de suelos y cuerpos de agua cercanos.

Es indispensable mantener el área alrededor del biodigestor limpia y debidamente señalizada, así como evitar fumar o encender fuego en sus proximidades. El biogás generado debe almacenarse en bolsas o tanques adecuados, y no se deben ingresar residuos químicos, detergentes o plásticos al sistema.

Además, el personal encargado debe recibir capacitación en el manejo seguro de biogás y biofertilizantes, ajustar la frecuencia de mantenimiento según las condiciones climáticas y volumen de producción, y fomentar la aplicación del digestato como fertilizante sostenible, promoviendo así el cierre del ciclo de nutrientes dentro de la finca.

#### 4.1.3.6 Registros y formatos

Formato sugerido para el registro de operaciones:

<b>Nombre:</b>			
<b>Código:</b>			
<b>Ubicación:</b>			
Mes	Semana	Frecuencia	Observación
Ene			
Feb			
Mar			
Abr			
May			
Jun			
Jul			
Ago			
Sep			
Oct			
Nov			
Dic			

**Simbología:**

- L = Lubricación.
- M = Mecánico.
- E = Eléctrico.
- EE = Electrónico.
- H = Hidráulico.
- N = Neumático.
- I = Inspección.
- R = Reparación.
- A = Aseo.
- C = Cambio.
- CP = Completar.
- IG = Inspección General.
- IT = Inspección de Tortillería.
- MGA = Mantenimiento General Anual.
- MPS = Mantenimiento Parcial Semestral

**Observación:**

Los mantenimientos se realizarán teniendo en cuenta las inspecciones generales y estado o condición de las partes o elementos, así como la vida útil recomendada.

**Elaborado Por:** \_\_\_\_\_

**Revisado Por:** \_\_\_\_\_

**Aprobado Por:** \_\_\_\_\_

Fuente: Elaboración propia

## 8.1. Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten evidenciar la viabilidad técnica de la implementación de un biodigestor tipo Taiwán en la Finca Experimental Lodana, considerando tanto la disponibilidad de residuos orgánicos como las condiciones ambientales y operativas del lugar.

Los estiércoles bovino y caprino presentan características físico-químicas adecuadas para la digestión anaeróbica, con relaciones C/N óptimas (24–25:1 en bovinos y 20–22:1 en caprinos) y un pH cercano a la neutralidad (6,5–7,2). Estos parámetros coinciden con lo reportado por Zhang y Jahng (2012), quienes señalan que una relación C/N entre 20:1 y 30:1 favorece la estabilidad del proceso de producción de biogás, evitando acumulación de amoníaco o retraso en la fermentación. Lo cual indica que las características físico – químicas de ambos tipos de estiércol garantizan un contenido suficiente de materia biodegradable para la generación de metano, lo que confirma la eficiencia del sustrato disponible en la finca.

Por otra parte, la estimación de la producción diaria total de biogás (55,77 m<sup>3</sup>/día) del presente estudio indica que el 77% proviene de estiércol bovino, además, los valores diarios de biogás (7,2 m<sup>3</sup>/día) se encuentran dentro del rango esperado para biodigestores tipo Taiwán de pequeña escala, lo cual coincide con lo descrito por Demirbas (2004), quien señala que la mayor contribución energética se encuentra en animales con mayor biomasa y sólidos volátiles, esto permite cubrir necesidades energéticas domésticas básicas, corroborando la relevancia de este sistema en la reducción del uso de combustibles fósiles y la gestión de residuos sólidos orgánicos.

Asimismo, el monitoreo de temperatura y pH evidenció condiciones óptimas para el desarrollo microbiano mesofílico, con temperaturas entre 26,2 °C y 38,7 °C y pH promedio cercano a 7. Estos resultados son consistentes con Watersupply EC (2022) y Pelegrín (2021), quienes destacan que las condiciones mesofílicas y un pH neutro facilitan la estabilidad del proceso metanogénico, maximizando la producción de biogás y reduciendo riesgos de inhibición.

Consecuentemente, el digestato generado ( $0,768 \text{ m}^3/\text{día}$ ) presenta un contenido significativo de nutrientes esenciales (N: 8,75 kg; P: 3,5 kg; K: 6,91 kg), lo que refuerza su potencial como fertilizante orgánico económico y sostenible. Estos hallazgos son respaldados por Mshandete et al. (2004) y Amon et al. (2008) en Viena, quienes destacan que el digestato contribuye al cierre de ciclos de nutrientes, mejora la estructura del suelo y favorece la actividad microbológica beneficiosa para los cultivos.

En relación con el diseño del biodigestor en la Finca Experimental Lodana, se obtuvo un volumen total de  $36 \text{ m}^3$ , el tiempo de retención hidráulico de  $35 \text{ m}^3/\text{días}$  y la relación estiércol:agua de 1:3. Estos parámetros garantizan un proceso de digestión estable y eficiente, en concordancia con los criterios planteados por Martí Herrero (2019) en su estudio de biodigestores tubulares, donde se destaca la importancia de mantener condiciones que favorezcan la digestión anaerobia. Asimismo, la relación largo-diámetro de 5,52 se encuentra dentro del intervalo sugerido (5–10), lo cual confirma que el diseño propuesto es técnicamente adecuado para el tipo de sustrato disponible y las condiciones de operación de la finca.

Finalmente, las características físico-químicas del estiércol permiten optimizar la eficiencia del proceso y garantizar resistencia mecánica y seguridad operativa. En conjunto, los resultados obtenidos en cuanto al dimensionamiento y las condiciones de operación del biodigestor son técnicamente apropiados para la producción de biogás y biofertilizante, lo que refuerza su aplicabilidad en contextos rurales con disponibilidad de estiércol bovino y caprino.

## CAPÍTULO VI

### 5.1. Conclusiones

Con base a la revisión bibliográfica, mostró que una humedad promedio del 75–80%, un pH cercano a la neutralidad (6.8–7.2) y una relación óptima de C/N es de 20–25:1, valores adecuados para los procesos de digestión anaerobia de calidad. Asimismo, el estiércol presentó un contenido adecuado de materia orgánica fermentable, lo que asegura su potencial como sustrato para la producción de biogás y como fuente de nutrientes para fertilizantes orgánicos.

Con base en las características de los residuos identificados, se establecieron parámetros de diseño que incluyen un tiempo de retención hidráulico estimado en 30–40 días y un volumen útil del biodigestor calculado según la producción diaria de estiércol. Los datos reflejan que el biodigestor tipo Taiwán se podría adaptar de manera eficiente a las condiciones de la finca, dado que permite alta eficiencia en la producción de biogás, mayor control sobre la digestión anaerobia y aprovechamiento integral de los subproductos (biogás y digestato) por lo cual, en cuanto a la información bibliográfica analizada se obtuvo un rendimiento total de 0,22 (m<sup>3</sup>/kg SV), una producción total de gas metano de 33,46 CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/día) y finalmente, biogás de 55,77 (m<sup>3</sup>/día).

Se elaboró un manual técnico que orienta las prácticas necesarias para garantizar la sostenibilidad del sistema, contemplando aspectos como: la alimentación diaria del biodigestor, la regulación de cargas orgánicas, el control de pH y temperatura, así como los protocolos de limpieza y mantenimiento preventivo. Además, se establecieron lineamientos de seguridad y de aprovechamiento del digestato como fertilizante orgánico rico en nitrógeno, fósforo y potasio, promoviendo así una producción agrícola sostenible y amigable con el medio ambiente.

## 5.2. Recomendaciones

Se recomienda mantener la recolección y mezcla adecuada de estiércol bovino y caprino en las proporciones calculadas, garantizando así la disponibilidad de materia prima con condiciones físico-químicas óptimas (humedad, pH y C/N) que favorezcan la producción estable de biogás y la obtención de fertilizantes orgánicos de calidad.

Es aconsejable operar el sistema bajo los parámetros de carga orgánica, tiempo de retención y volumen útil establecidos en el diseño, evitando sobrecargas o variaciones que puedan afectar la eficiencia del proceso. El uso del biodigestor tipo Taiwán debe complementarse con un monitoreo constante para asegurar el máximo aprovechamiento energético y agrícola de los subproductos.

Se recomienda aplicar rigurosamente las prácticas descritas en el manual técnico, incluyendo la alimentación diaria, la regulación del pH y la temperatura, así como el mantenimiento preventivo del equipo. Además, debe fomentarse el uso del digestato como fertilizante orgánico, impulsando una producción agrícola sostenible y ambientalmente responsable.

## ANEXOS

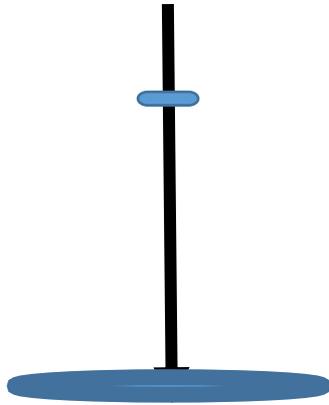
### MEDIDAS DE TANQUE REMOBEDOR



Motor de 1Hp – 110 V a 220 V

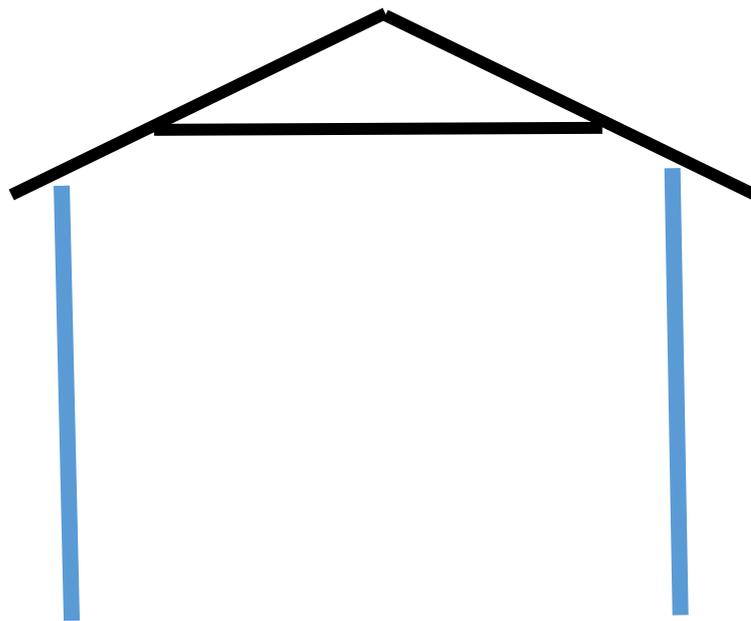


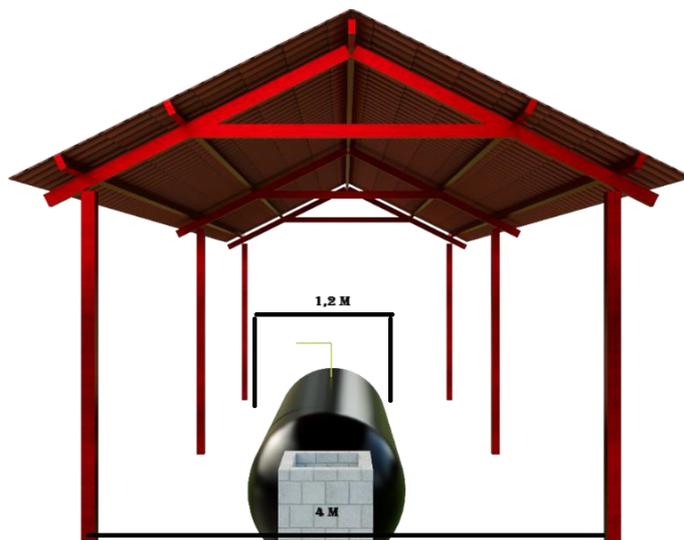
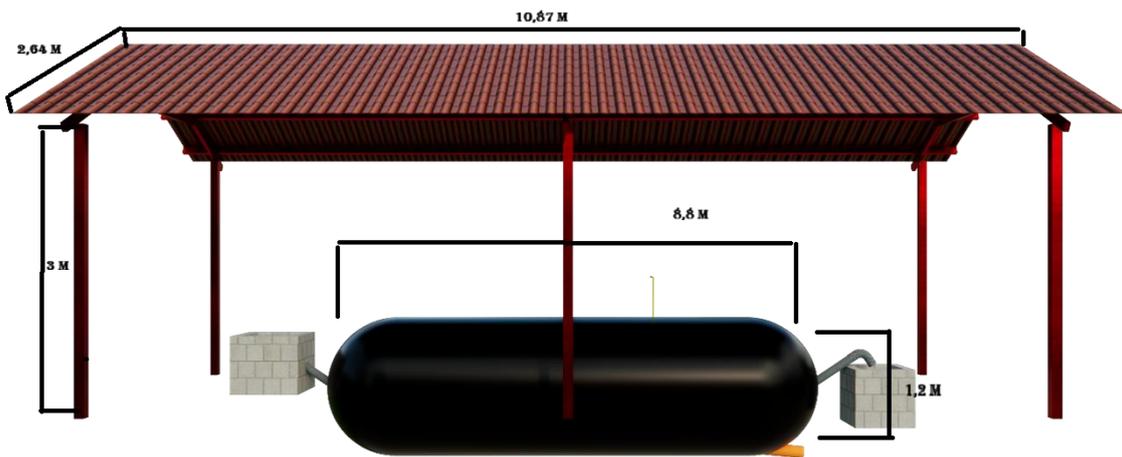
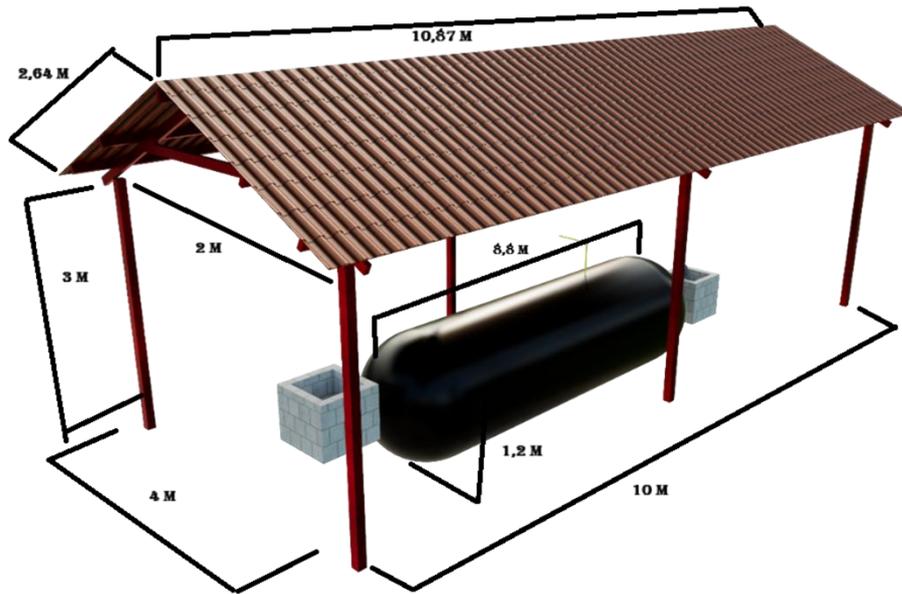
EJE DE ASPAS Y ENGRANAJES

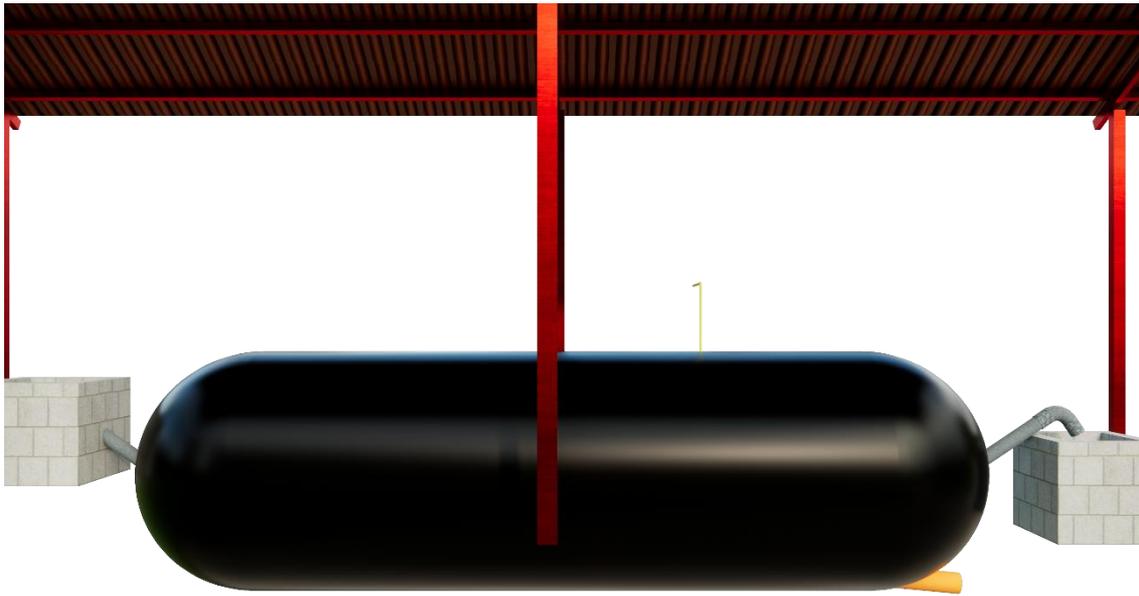


ASPAS

Estructura de cubierta biodigestor







## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva Bravo, AE. 2023. Diseño de un biodigestor tipo Taiwán para la generación de biogás utilizando pulpa de café para energizar un caserío
- Amon, Thomas., Amon, Barbara., Kryvoruchko, Vitaliy., Machmueller, Andrea., Hopfner-Sixt, Katharina., Bodiroza, Vitomir., Hrbek, Regina., Friedel, Jürgen., Pötsch, Erich., Wagentristl, Helmut., Schreiner, Matthias y Zollitsch, Werner. 2008. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource technology*. 98. 3204-12. 10.1016/j.biortech.2006.07.007.
- Armas Cabrera, JP. 2018. Estudio y análisis de un sistema de producción de energía renovable a través del procesamiento de residuos sólidos orgánicos para aplicación en la U.C.S.G. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11403>.
- Barrena Gurbillón, M., Cubas Alarcón, F., Gosgot Angeles, W., Ordinola Ramírez, C., Rascón Barrios, J. y Huanes Mariños, H. 2019. Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 725-734. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26214>
- 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: Revisión. *Revista Agunkuyâa*, 2, 5–24.
- Cueva, C. C. 2018. *Aprovechamiento de residuos de plátano, cacao y maíz como sustratos para la producción del hongo Pleurotus ostreatus, en la comunidad La Magdalena de Francisco de Orellana*. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas. 87 p.

- Demirbas, A. 2004. *Biomass resources and biofuels*. Energy Conversion and Management, 45(12), 2371-2382. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.09.013>
- Durazno, C. A. 2018. *Valorización de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas*. Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Carrera de Ingeniería Ambiental. 86 p.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2004. *Managing manure nutrients at concentrated animal feeding operations*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://archive.epa.gov/epa/sites/production/files/2019-10/documents/managing-manure-nutrients-aug-2004.pdf> US EPA
- Espinoza, E., Menéndez, D., & Moreno, L. 2018. *Manual técnico para la producción de biogás a pequeña escala con biodigestores*. Universidad Técnica de Manabí.
- Espinoza, J; Navarrete, A; Moran, N; Vergara, K. 2018. Propuesta agroecológica para el desarrollo sustentable del centro Experimental Lodana cantón Santa Ana, provincia de Manabí. (en línea). Ciencia Digital 2(4):141-176. DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i4.215>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2021. *Small ruminant production & health as a social & economic buffer against climate shock*. FAO. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb7965en>
- FAO. 2019. Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores (en línea). s.l., FAO; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca5082es>.
- FAO. 2020. *Biogás: Tecnología, manejo y uso*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/i8827s/i8827s.pdf>

- González Salcedo, LO; Olaya Arboleda, Y. 2012. Fundamentos para el diseño de Biodigestores (en línea) (En accepted: 2019-06-24t23:44:53z). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10762>.
- Guerrero, D. 2019. Evaluación de la producción de estiércol caprino para biodigestión anaerobia [Tesis]. Universidad Autónoma Chapingo. (*Disponible en el repositorio institucional de la UACH.*)
- Hernández, MAC; López, CWS. 2023. Diseño de biodigestor casero para producción de biogás y fertilizante (en línea). Revista Multidisciplinaria de Investigación (REMI) 2(Ciencias Sociales, Economía, Ingeniería y Arquitectura, etc.):65-71. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8339322>.
- INAMHI. 2024. Servicios Meteorológicos y Climáticos para Mayo de 2024 (en línea, sitio web). <https://servicios.inamhi.gob.ec/>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. Sixth Assessment Report: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., Mohammed, A. J., Ghazy, H., Shakir, M. N., Lawas, A. M., Mohammed, S. K., Idan, A. H., Mahmoud, Z. H., Sayadi, H., & Kianfar, E. 2024. Biogás: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. Results in Chemistry, 7, 101549. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549>
- Kougias, P. G., Kotsopoulos, T. A., & Martzopoulos, G. G. 2014. Effect of feedstock composition and organic loading rate during the mesophilic co-digestion of olive mill wastewater and swine manure. Renewable Energy, 69(3), 202-207. <https://doi.org/>
- Kummamuru, B. 2016. *WBA Global Bioenergy Statistics 2017*. World Bioenergy Association.
- Liu, C., Li, H., Zhang, Y., & Liu, C. (2016). Improve biogás production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with

- food waste. *Bioresource Technology*, 219(1), 252-260. <https://doi.org/>
- Lombo, D., Villanueva, C., y Coto, F. 2022. Manejo integral del estiércol en fincas productoras de leche en Costa Rica. [https://www.researchgate.net/publication/362372411\\_Manejo\\_integral\\_d\\_el\\_estiercol\\_en\\_fincas\\_productoras\\_de\\_leche\\_en\\_Costa\\_Rica](https://www.researchgate.net/publication/362372411_Manejo_integral_d_el_estiercol_en_fincas_productoras_de_leche_en_Costa_Rica)
- MAE, Ministerio de Ambiente de Ecuador. 2015. MAE presentará propuesta a la Junta Ejecutiva del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.ambiente.gob.ec/mae-presentara-propuesta-a-la-junta-ejecutiva-del-mecanismo-para-un-desarrollo-limpio-mdl/>.
- Martí Herrero, J. 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. La Paz: GTZ-Energía.
- Meteoblue. 2023. Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Portoviejo (en línea, sitio web). Disponible en [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/portoviejo\\_ecuador\\_3652941](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/portoviejo_ecuador_3652941).
- Mshandete, A. M., Björnsson, L., & Kivaisi, A. K. 2004. Anaerobic batch digestion of sisal pulp and fish wastes. *Renewable Energy*, 29(2), 253-269. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852404000331?via%3Dihub>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2022. Climate Change and Atmospheric Composition. National Aeronautics and Space Administration.
- Patarroyo Moreno, LM. 2022. Diseño de biodigestor a partir de porcinoza (en línea). Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9087>.
- Pelegrín, R, C. 2021. Diseño de un digestor anaerobio para codigestión de

fangos de depuración y residuos líquidos de la industria alimentaria, con capacidad para tratar hasta 120 m<sup>3</sup>/d. Trabajo de titulación (Maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. pp. 1-98.

- Pérez, PQ; Meza, RH; Nolasco, LRG; Mejía, KAT; Fera, JÁI. 2020. Estudio de la generación de biogás a partir de basura orgánica, usando un biodigestor domestico (en línea). *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability* 4(1):43-61. DOI: <https://doi.org/10.19136/jeeos.a4n1.3480>.
- Quispe Condori, RL. 2021. Evaluación de un biodigestor de flujo discontinuo para generar biogás a partir de excretas de ganado vacuno en zonas alto andinas, Juliaca - 2020 (en línea). <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4933>.
- Ríos, C., & Martínez, J. 2019. *Producción y aprovechamiento del biogás en sistemas agropecuarios sostenibles*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, M., y Salgado, R. 2021. Composición del estiércol animal como fuente de nutrientes en la producción orgánica. *Revista Científica Agropecuaria*, 25(1), 88–95. <https://doi.org/10.22201/agi.2021.25.1.4321>
- Rojas, L. 2017. Manejo de estiércol bovino en sistemas ganaderos. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 30(2), 147–158.
- Salazar Abad, J. B., y Arias Bonilla, J. L. 2016. *Diseño y construcción de un biodigestor para producción de biogás a partir de estiércol vacuno en la Finca Isabel de la parroquia Taracoa, provincia de Orellana* (Trabajo de titulación de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas). Riobamba, Ecuador.
- Santos Freire, J. 2020. Implantación de un sistema de saneamiento optimizado mediante un biodigestor en una aldea de Zimbabwe.

<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/46467>.

- Secretaría de Energía. 2008. Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa (en línea). s.l., s.e. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://www.energia.gob.a r/contenidos/archivos/publicaciones/libro\_energia\_biomasa.pdf.
- Torres, J., Pérez, M., y Ramírez, C. 2020. Energías renovables y su impacto en el medio ambiente. Editorial Académica Española.
- Tortosa, G. 2019. Materiales para compostar: estiércol de vaca. COMPOSTANDO CIENCIA.
- ULEAM. 2021. ULEAM - Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (en línea, sitio web). <https://www.uleam.edu.ec/rector-realiza-recorrido-en-las-fincas-de-la-uleam-en-lodana-y-los-bajos/>.
- Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA]. 2019. Desarrollo rural y energías renovables: Experiencias con biodigestores. Repositorio UDCA.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia [UNAD]. 2018. Implementación de biodigestores en sistemas agropecuarios sostenibles. Repositorio UNAD.
- Varnero Moreno, M.T. 2011. Manual de biogás. Proyecto CHI/00/G32: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Santiago de Chile, CL, Ministerio de Energía; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; *Global Environment Facility*. 124 p. ISBN 978-95-306892-0. Diseño y diagramación: Hernán Romero.
- Vera, R. 2013. Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino (R. Vera, Ed.; Creative Commons, Vol. 15). <https://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/2014/v15n3-09.pdf>.

- Watersupply EC. 2022. Guía de operativa, instalación y operativa de biodigestor agrícola. No. 8. pp. 1–16.
- Wei, Y., Li, X., Yu, L., Zou, D., y Yuan, H. 2015. Mesophilic anaerobic codigestion of cattle manure and corn stover with biological and chemical pretreatment. *Bioresource Technology*, 198(1), 431-436. <https://doi.org/>
- Zambrano Zambrano, E. E. 2020. *Informe anual 2020: Estación Experimental Portoviejo*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- Zhang, L., Jahng, D. 2012. Effects of C/N ratio and pH on methane production and microbial community during anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, 118, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.075>
- Zhang, N., Deng, J., Ahmad, F., y Draz, M. U. 2020. Local Government Competition and Regional Green Development in China: The Mediating Role of Environmental Regulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10), 3485. <https://doi.org/10.3390/ijerph17103485>