

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA  
INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN DIGESTOR  
ANAEROBIO DE FLUJO CONTINUO PARA EL TRATAMIENTO DE  
ESTIÉRCOL BOVINO EN LA FINCA “RANCHO SANTA ESTHER”  
DEL SECTOR “LA DELICIA” PARROQUIA TULCÁN, CANTÓN  
TULCÁN, PROVINCIA DEL CARCHI, ECUADOR.**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DE GRADO ACADÉMICO O TÍTULO  
DE: INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA**

**ELABORADO POR:**

**AMANDA ISABEL PAZMIÑO ZUMÁRRAGA**

**SANGOLQUÍ, 17 de Diciembre del 2012**

# **HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS**

**ELABORADO POR**

---

Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga

**COORDINADOR DE LA CARRERA**

---

Ing. Tatiana Páez Barrera

**SECRETARIO ACADÉMICO**

---

Abg. Carlos Orozco. Msc.

Sangolquí, 17 de Diciembre del 2012

## CERTIFICACIÓN

Ing. Lucía Jiménez T. Msc.

Ing. Verónica Marcillo P.

### **Certifican:**

Que el trabajo titulado, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO DE FLUJO CONTINUO PARA EL TRATAMIENTO DE ESTIÉRCOL BOVINO EN LA FINCA “RANCHO SANTA ESTHER” DEL SECTOR “LA DELICIA” PARROQUIA TULCÁN, CANTÓN TULCÁN, PROVINCIA DEL CARCHI, ECUADOR, realizado por Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Sangolquí, 17 de Diciembre del 2012

---

Ing. Lucía Jiménez. T. Msc.

DIRECTORA

---

Ing. Verónica Marcillo P.

CODIRECTORA

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga

### **Declaro que:**

El proyecto de grado denominado, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO DE FLUJO CONTINUO PARA EL TRATAMIENTO DE ESTIÉRCOL BOVINO EN LA FINCA “RANCHO SANTA ESTHER” DEL SECTOR “LA DELICIA” PARROQUIA TULCÁN, CANTÓN TULCÁN, PROVINCIA DEL CARCHI, ECUADOR, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 17 de Diciembre del 2012.

---

Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo, **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO DE FLUJO CONTINUO PARA EL TRATAMIENTO DE ESTIÉRCOL BOVINO EN LA FINCA “RANCHO SANTA ESTHER” DEL SECTOR “LA DELICIA” PARROQUIA TULCÁN, CANTÓN TULCÁN, PROVINCIA DEL CARCHI, ECUADOR**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 17 de Diciembre de 2012.

---

Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga

## **DEDICATORIA**

A mis Abuelitos:

Laura Vargas y Luis Pazmiño

**Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga.**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme llegar a este punto de la vida, y en los momentos de soledad manifestarse de la manera más increíble, iluminándome y dándome esperanza para continuar.

A mi madre y mejor amiga en el mundo, que con su fortaleza, abnegación me ha ayudado a formar mi carácter y a ser quien soy. Y con ese sexto sentido, presintiendo siempre cuando las cosas se ponen difíciles, pero apoyándome y dándome ánimo para seguir adelante.

A mi padre, por su apoyo no solo económico sino por su predisposición para acompañarme y hacer varios viajes conmigo a Tulcán y sacarme de más de un apuro durante la universidad.

A mi abuelito, mi eterno agradecimiento por su asesoramiento en la construcción del equipo digestor, sin el no habría sido posible hacer este proyecto, y ni hablar de los múltiples viajes que hicimos juntos. A mi Abuelita y mi tía Charito por su compañía y su buen ánimo que hizo más ameno el viaje. A mi tía abuelita Enma por siempre estar pendiente de mi y siempre darme ese apoyo económico.

A mis tíos, Clelia, e Iván, mi agradecimiento sincero por acogerme durante tres meses en Atuntaqui, tratándome como su hija y haciendo de mi estadía la mejor posible.

A mis tíos, Yolanda y Ulpiano, mi agradecimiento por haberme facilitado algunos de los materiales más importantes y estar siempre dispuestos a ayudarme.

A mis primos, Tatiana, Freddy, Stephanie y Esteban, por acogerme en Ibarra y hacerme parte de su familia, sin su buena voluntad de ayudarme, no sería lo mismo.

A mis directoras de grado Ing. Lucía Jiménez e Ing. Verónica Marcillo, por darme su tiempo, apoyo y asesoramiento profesional, además de brindarme sus valiosos consejos y amistad.

Al Señor José María Acosta, dueño de la Finca “Rancho Santa Esther” por permitirme realizar este proyecto en sus instalaciones y poner en práctica mis conocimientos como ingeniera en Biotecnología. Y a sus trabajadores “Don Esteban” “Don Diego” y “Don José” por su apoyo y colaboración haciendo el trabajo “sucio”.

A mis amigas, Gaby, Zayda Claudia y Analía, por hacer de la vida universitaria una experiencia imborrable, entre momentos de alegría, noches de estudio pero sobre todo apoyándonos en los momentos más tristes. A María del Rosario que durante la realización de este proyecto logramos una bonita amistad y a mi amigo Esteban por su colaboración en la elaboración de los planos del digestor.

A Andrés, por darme ese toque de maldad que hacía falta en mi vida, por escucharme y apoyarme cuando necesité, pero sobre todo por crecer conmigo durante estos años.

A mis amigas del colegio, Jackie, Abeja y Aleja, por su constante preocupación por mi, por su lealtad y gran amistad que ha perdurado durante tantos años.

A Martina y Camila por darme todo su cariño y fidelidad, por acompañarme siempre sin importarles la hora, durante las largas noches de estudio en toda la universidad.

**Amanda Isabel Pazmiño Zumárraga.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>Pág.</b>
ÍNDICE	X
LISTADO DE TABLAS	XIV
LISTADO DE FIGURAS	XVI
LISTADO DE ANEXOS	XVIII
RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XX
NOMENCLATURA	XXI
GLOSARIO	XXIII

# ÍNDICE

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Ítem.	Contenido	Pág.
1.1.	Formulación del problema.	1
1.2.	Justificación del problema.	2
1.3.	Objetivos del proyecto.	4
1.3.1.	Objetivo principal.	4
1.3.2.	Objetivos específicos.	5
1.4.	Marco teórico.	5
1.4.1.	Aspectos generales.	5
1.4.2.	Conceptos generales.	7
1.4.2.1.	Ganado bovino en el Ecuador.	7
1.4.2.2.	Alimento del ganado vacuno.	7
1.4.2.3.	Estiércol/excretas/purines.	9
1.4.2.4.	Estiércol bovino.	10
1.4.2.5.	Aplicaciones del estiércol.	13
1.4.2.6.	Aprovechamiento del excremento en la producción de biogás.	14
1.4.2.7.	Biogás.	15
1.4.2.8.	Métodos para cuantificar y analizar el biogás.	21
1.4.2.9.	Procesos de biodigestión.	23
1.4.2.10.	Proceso de digestión anaerobia.	24
1.4.2.11.	Proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaerobia.	26
1.4.2.12.	Digestor.	39
1.4.2.13.	Tipos de digestores.	39
1.4.2.14.	Factores que determinan la producción de gas.	42
1.4.2.15.	Bioabono/biol.	51
1.4.2.16.	Agitación.	52
1.4.2.17.	Estabilización con cal.	52
1.4.2.18.	Aislamiento térmico.	53
1.4.2.19.	Aireación dentro de un proceso anaerobio.	54

1.5.	Análisis descriptivo de datos.	54
1.5.1.	Estimación puntual y por intervalo.	55
1.5.2.	Media Aritmética.	56
1.5.3.	Estimación por intervalos de confianza para la media.	56
1.5.4.	Criterio de rechazo de hipótesis.	57

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

<b>Ítem.</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
2.1.	Localización geográfica.	58
2.2.	Procesamiento y equipos.	59
2.2.1	Etapas del proyecto.	59
2.2.2.	Etapa preliminar.	61
2.2.2.1	Recolección y transporte de estiércol bovino.	61
2.2.2.2.	Análisis elemental de estiércol.	62
2.2.3.	Diseño y construcción del equipo de digestión anaerobio continuo.	63
2.2.3.1.	Determinación de los parámetros de diseño.	63
2.2.3.2.	Dimensionamiento del sistema de digestión anaerobio.	63
2.2.3.4.	Determinación de posibles fallas en el sistema anaerobio construido.	70
2.2.4.	Operación del equipo de digestión anaerobio continuo.	71
2.2.4.1.	Parámetros de operación.	71
2.2.4.2.	Carga inicial.	71
2.2.4.3.	Estabilización.	72
2.2.4.4.	Carga regular.	72
2.2.5.	Análisis de productos obtenidos.	72
2.2.5.1	Análisis de la calidad de biol y biogás generado.	72
2.2.5.2.	Análisis de eficiencia de la digestión anaerobia.	73
2.3.	Análisis descriptivo de datos.	74

## **CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

<b>Ítem.</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
3.1.	Etapa preliminar.	75
3.1.1.	Recolección de estiércol bovino.	75
3.1.2.	Análisis elemental de estiércol.	76
3.2.	Diseño y construcción del equipo de digestión anaerobio continuo.	78
3.2.1.	Determinación de los parámetros de diseño.	78
3.2.2.	Dimensionamiento del sistema de digestión anaerobio.	80
3.2.2.1.	Tanque recolector.	80
3.2.2.2.	Tanque digesor.	81
3.2.2.3.	Gasómetro.	86
3.2.3.	Construcción y armado del digesor anaerobio.	87
3.2.3.1.	Tanque de almacenamiento de estiércol.	87
3.2.3.2.	Digesor.	87
3.2.3.3.	Gasómetro o sistema de almacenamiento de biogás.	88
3.2.3.4.	Accesorios.	88
3.3.	Operación del equipo de digestión anaerobio continuo.	90
3.3.1.	Monitoreo de parámetros operativos.	90
3.3.2.	Carga inicial.	91
3.3.3.	Estabilización.	92
3.3.4.	Carga regular.	93
3.4.	Procesamiento de resultados.	94
3.4.1.	Análisis de parámetros operativos.	94
3.4.1.1.	Monitoreo de pH.	94
3.4.1.2.	Monitoreo de temperatura.	96
3.4.1.3.	Tiempo de retención.	98
3.4.2.	Biogás.	98
3.4.2.1.	Producción de biogás en función del pH.	98
3.4.2.2.	Producción de biogás en función de la temperatura.	99
3.4.2.3.	Producción de biogás en función del tiempo de retención.	101
3.4.2.4.	Evaluación del volumen de gas generado.	102

3.4.2.5.	Análisis cualitativo de biogás.	103
3.4.3.	Biol.	105
3.4.3.1.	Análisis cualitativo del biol.	104
3.4.3.2.	Análisis comparativo del estiércol de ganado y biol.	106
3.4.3.3.	Análisis de eficiencia de la digestión anaerobia.	110
3.5.	Análisis estadístico de datos.	111
3.5.1.	Planteamiento de la hipótesis.	111
3.5.2.	Intervalo de confianza para la media.	111
3.5.3.	Estadístico de prueba.	112

#### **CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

<b>Ítem.</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
4.1.	Conclusiones.	113
4.2.	Recomendaciones.	115

#### **CAPÍTULO V. FUENTES DE INFORMACIÓN**

<b>Ítem.</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
5.1.	Bibliografía.	116
5.2.	Webgrafía.	120

<b>ANEXOS</b>		<b>122</b>
---------------	--	------------

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1.	Producción de estiércol fresco diario.	11
Tabla 1.2.	Composición promedio de nutrientes esperadas de estiércol bovino en comparación con otras especies de animales.	11
Tabla 1.3.	Relación del contenido de nitrógeno y carbono en estiércol bovino comparado con otras razas de animales.	12
Tabla 1.4.	Propiedades de una composición estándar de biogás.	15
Tabla 1.5.	Tabla comparativa entre diferentes gases.	16
Tabla 1.6.	Equivalencias energéticas del biogás.	16
Tabla 1.7.	Componentes del biogás y su efecto en las propiedades.	17
Tabla 1.8.	Productos en la generación de biogás.	20
Tabla 1.9.	Variación del tiempo de retención en función de la temperatura en diversos componentes de la biomasa.	30
Tabla 1.10.	Reacciones acetogénicas que ocurren en los sistemas anaerobios.	35
Tabla 1.11.	Principales reacciones metanogénicas	37
Tabla 1.12.	Características de las fases microbiológicas de la biomasa.	39
Tabla 1.13.	Parámetros presentes en las etapas principales de degradación.	43
Tabla 1.14.	Tabla comparativo sustrato vs. Tiempo de retención.	45
Tabla 1.15.	Tabla comparativo temperatura vs. Tiempo de retención.	46
Tabla 1.16.	Características de la materia orgánica utilizada en biodigestión anaeróbica.	49
Tabla 1.17.	Valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes.	50
Tabla 2.1.	Días de recolección de estiércol.	61
Tabla 2.2.	Análisis de laboratorio.	62
Tabla 2.3.	Registro de recolección y pesado de estiércol bovino generado en la Finca “Rancho Santa Esther”.	64
Tabla 2.4.	Datos para el cálculo de cantidades de sustrato para carga inicial.	66
Tabla 2.5.	Datos para el cálculo de sustrato para la carga regular.	67

Tabla 2.6.	Lista de materiales utilizados en la construcción y armado del sistema anaerobio para el tratamiento de estiércol bovino en la Finca “Rancho Santa Esther”.	69
Tabla 2.7.	Valores de referencia para los parámetros de operación.	71
Tabla 2.8.	Análisis de biogás y biol generado.	72
Tabla 3.1.	Resultados del análisis de la Finca Vs. Resultados referenciales.	77
Tabla 3.2.	Parámetros del digestor.	78
Tabla 3.3.	Producción por día de estiércol bovino Finca “Rancho Santa Esther”.	80
Tabla 3.4.	Datos para el cálculo de relación C/N del estiércol.	82
Tabla 3.5.	Datos para el cálculo de cantidades de sustrato para carga inicial.	83
Tabla 3.6.	Cantidad de sustrato para la carga inicial del digestor.	84
Tabla 3.7.	Datos para el cálculo de sustrato para la carga regular.	85
Tabla 3.8.	Cantidad de sustrato para la carga regular del digestor.	86
Tabla 3.9.	Acción a realizada de acuerdo al parámetro de control evaluado.	91
Tabla 3.10.	Composición de dióxido de carbono y metano en el biogás.	103
Tabla 3.11.	Análisis del efluente/biol generado durante la digestión anaerobia.	105
Tabla 3.12.	Parámetros en el estiércol y biol del digestor anaerobio	107

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1.1.	Aplicaciones del biogás.	17
Figura 1.2.	Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos	27
Figura 1.3.	Formación de los monómeros en la hidrólisis.	28
Figura 1.4.	La ruta glucolíticas de Embden-Meyerhof-Parnas provoca la conversión de glucosa en piruvato.	32
Figura 1.5.	Esquema general de la degradación acetogénica.	34
Figura 1.6.	Formación de metano a partir de acetato, esto para el mecanismo generado por las coenzimas A y M.	38
Figura 1.7.	Rangos de operación para organismos mesófilos o termófilos.	44
Figura 1.8.	Producción de gas en función del TRH.	45
Figura 2.1.	a) Entrada principal al sector La Delicia, b) Entrada al sector La Delicia y Las Peñas, c) Vista de la finca “Rancho Santa Esther”.	58
Figura 2.2.	Etapas del proyecto Diseño, construcción e implantación de un digestor anaerobio de flujo continuo para el tratamiento de estiércol bovino en la Finca “Rancho Santa Esther” Tulcán-Ecuador.	60
Figura 3.1.	Fotografía del Tanque recolector.	81
Figura 3.2.	Diagrama de balance de masas.	83
Figura 3.3.	Fotografía de la adaptación de tanques.	89
Figura 3.4.	Fotografía del tanque digestor con el forro de lana de vidrio.	89
Figura 3.5.	Fotografías de la instalación del digestor en la Finca.	89
Figura 3.6.	Fotografía de la termocupla y termómetro ambiental.	90
Figura 3.7.	Fotografía del sistema anaerobio instalado en la Finca “Rancho Santa Esther”.	90
Figura 3.8.	Fotografías de la carga inicial.	92
Figura 3.9.	Fotografía de carga regular al digestor.	94

Figura 3.10.	Fotografía de descarga regular en el digestor.	94
Figura 3.11.	Fotografía de regulación del pH.	94
Figura 3.12.	Fotografía de la construcción de invernadero.	94
Figura 3.13.	Evaluación del pH durante todo el proceso anaeróbico.	95
Figura 3.14.	Monitoreo de temperatura ambiente e interna del digestor anaerobio.	96
Figura 3.15.	Evaluación de la relación pH Vs. Volumen de gas producido.	98
Figura 3.16.	Producción de gas Vs. Temperatura digestor desde el día 1.	99
Figura 3.17.	Producción de gas Vs. Temperatura ambiente desde el día 1.	99
Figura 3.18.	Producción de gas Vs. Temperatura digestor desde el día 44.	99
Figura 3.19.	Producción de gas Vs. Temperatura ambiente desde el día 44.	99
Figura 3.20.	Producción de gas durante 107 días.	100
Figura 3.21.	Volumen de gas L/d durante 107 días.	101
Figura 3.22.	Gas metano encendido.	104
Figura 3.23.	DQO presente en el estiércol y biol.	109
Figura 3.24.	DBO5 presente en el estiércol y biol.	109

## LISTADO DE ANEXOS

<b>Anexo</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
ANEXO A	Resultados de los análisis preliminares de Heces de Bovino realizados en los laboratorios de la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra.	122
ANEXO B	Criterios técnicos de construcción del digestor anaerobio.	124
ANEXO C	Planos de la construcción del sistema anaerobio del sistema anaerobio.	127
ANEXO D	Instructivo de operación y monitoreo del digestor operación del digestor anaerobio.	132
ANEXO E	Resultados de los análisis de biol realizados en los laboratorios del centro de investigaciones y control ambiental (CICAM) de la Escuela Politécnica Nacional.	136
ANEXO F	Datos y cálculos previos para la determinación del intervalo de confianza para la media aritmética.	137
ANEXO G	Bitácora del monitoreo del digestor anaerobio Finca “Rancho Santa Esther”.	140
ANEXO H	Resultados de los análisis de biogás realizados en los laboratorios del centro de investigaciones y control ambiental (CICAM) de la Escuela Politécnica Nacional.	145

## Resumen

El Ecuador cuenta con 5,5 millones de cabezas de ganado y las mesetas de la provincia del Carchi constituyen zonas óptimas para la crianza de ganado de leche y carne, aportando con 4,78% de la producción de leche en el total nacional. La finca “Rancho Santa Esther” cuenta con 98 vacas, de las cuales 36 son lecheras. Durante todo este tiempo el manejo del estiércol generado durante el ordeño ha sido enviado a la acequia, sin ningún tratamiento previo, lo que se ha constituido en un verdadero problema ambiental y de salud.

Este proyecto diseña, construye e implanta un digestor anaerobio de flujo continuo, para tratamiento de estiércol bovino en la Finca “Rancho Santa Esther” ubicada en el cantón Tulcán, provincia del Carchi, en primer lugar se evaluó la cantidad y calidad del estiércol generado diariamente, se determinó los parámetros de diseño y con ello se realizó el dimensionamiento del sistema de digestión anaerobio, que consiste en un tanque recolector de estiércol, un tanque digestor y dos tanques gasómetros a manera de campana para el almacenamiento del gas generado, más una serie de accesorios para el monitoreo de parámetros operativos. Luego se puso en funcionamiento el equipo para lo que se calculó la carga inicial de estiércol y agua, se esperó durante la etapa de estabilización, finalmente, se calculó la carga regular que debía ingresar al digestor por día.

El sistema de digestión anaerobio se operó durante 107 días, el mismo que fue directamente afectado por la temperatura fría de la zona (12-18°C), debido a que la velocidad del proceso de digestión depende directamente de ella, obligando a trabajar al equipo en condiciones psicofílicas; durante el monitoreo; la temperatura fue el parámetro que determinó también la producción de CH<sub>4</sub> llegando a elevarse la campana del gasómetro 34,20 cm, lo que significó en promedio 54,64 Litros CH<sub>4</sub>/día; el biogás presentó una composición > 45% de CH<sub>4</sub> y 38,4% de CO<sub>2</sub>, lo que hizo que fuera un gas inflamable. Además se obtuvo biol, que presentó valores de N<sub>2</sub>, C y P<sub>4</sub> dentro de los rangos bibliográficos, sin embargo la cantidad de coliformes no fue óptimo puesto que en lugar de obtenerse cero se obtuvieron 430 UFC's; finalmente al comparar la DQO y DBO del estiércol con la del biol se obtuvo una eficiencia de remoción del 71,20% y del 82,25% respectivamente.

## **Abstract**

Ecuador has 5,5 millions of cattle and the lands that belong to the province of Carchi are optimal for raising beef and milk cattle, contributing with 4,78% of the national production of milk. The farm “Rancho Santa Esther” has 98 cows, and 36 of them produce milk every day. All the manure generated during the process of milking, has been sent to the ditch, without any previous treatment, which has become a real environmental and health problem.

This project designs, constructs and implements a continuous flow anaerobic digester for treatment of cattle manure in the farm “Rancho Santa Esther” located in Tulcán, Carchi, Ecuador. First, the quantity and quality of the daily manure produced was evaluated, then the design parameters were determined and finally the anaerobic digestion system was dimensioned. This system consists in a manure collector tank, a digester tank and two gasometers tanks that simulate a bell for the storage of the gas produced, plus several accessories for monitoring the operative parameters. Then the equipment began functioning. For this, the initial load of manure and water was calculated, it had a stabilization stage, and finally the regular load that had to get into the digested per day was calculated.

The anaerobic digestion system was operated during 107 days, and it was directly affected by the cold temperature of the zone (53,6-64,4°F). The speed of the digestion process depends directly on the temperature, forcing the equipment to work in psychrophilic conditions. During the monitoring process, temperature was a parameter that determined the production of CH<sub>4</sub>, and it made gasometer bell to reach 34,20 cm, which was equal to have an average of 54,64 Liters CH<sub>4</sub>/day; the biogas presented a composition >45% CH<sub>4</sub> and 34,4% CO<sub>2</sub>, making it an inflammable gas. In addition, biofertilizer was obtained and it showed values of N<sub>2</sub>, P<sub>4</sub> and C that were in the bibliographic ranges. However the number of coliformes was not optimal, because instead of having a measure of zero, 439 CFU were located. Finally comparing COD and BOD manure with the biofertilizer, the removal efficiency was 71,20% and 82,25% respectively.

## NOMENCLATURA

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>
<b>AGCL</b>	Ácidos grasos de cadena larga.
<b>AGV</b>	Ácidos grasos volátiles.
<b>Cf</b>	Concentración del efluente.
<b>Co</b>	Concentración del afluente.
<b>DBO</b>	Demanda bioquímica de oxígeno.
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno.
<b>GC</b>	Cromatografía de gases.
<b>GEI</b>	Gases efecto invernadero.
<b>GLC</b>	Cromatografía gas-líquido.
<b>GSC</b>	Cromatografía gas-sólido.
<b>m.s.n.m</b>	Metros sobre el nivel del mar.
<b>MNPC</b>	Muy numerosas para contar.
<b>MO</b>	Materia orgánica.
<b>NADH</b>	Dinucleótido de nicotinamida y adenina (reducido).
<b>NPM</b>	Número más probable.
<b>PB</b>	Producción de biogás.
<b>Q<sub>A</sub></b>	Volumen de agua a ingresar al digestor.
<b>Q<sub>EB</sub></b>	Volumen de estiércol bovino a ingresar al digestor.
<b>Q<sub>M</sub></b>	Volumen del sustrato.
<b>ST</b>	Sólidos totales.
<b>SV</b>	Sólidos volátiles.
<b>TM</b>	Toneladas métricas.
<b>TRH/t<sub>0</sub>/θh</b>	Tiempo de retención hidráulica.
<b>UFC's</b>	Unidad formadora de colonias.
<b>Vf</b>	Volumen funcional.
<b>Vin</b>	Volumen del inóculo.
<b>Vt</b>	Volumen total.
<b>X<sub>EB</sub></b>	Fracción del % de Humedad de estiércol bovino.

$X_{HA}$	Fracción del % de Humedad del agua.
$X_{HM}$	Fracción del % de Humedad de la mezcla (agua + estiércol).
$X_{MSA}$	Fracción del % de Materia seca del agua.
$X_{MSEB}$	Fracción del % de Materia seca de estiércol bovino.
$X_{MSM}$	Fracción del % de Materia seca de la mezcla (agua + estiércol).

## GLOSARIO

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
<b>Acequia:</b>	Zanja o canal por donde conducen las aguas para regar y para otros fines.
<b>Ácidos urónicos:</b>	Cuando la oxidación de la aldosa solo forma un grupo carboxilo en alcohol primario y se conserva intacto el aldehído se obtiene un ácido urónico, como el Á. Glucurónico.
<b>Alcalinidad:</b>	Medida de la capacidad del agua para absorber protones.
<b>Anquilostomiasis:</b>	Infección intestinal causada por un gusano parasitario de las especies nematodas <i>Necator americanus</i> y <i>Ancylostoma duodenale</i> .
<b>Asepsia:</b>	Ausencia total de microorganismos patógenos y no patógenos.
<b>Bacterias acetogénicas:</b>	Son las encargadas de transformar los compuestos intermedios que quedan de la acción de las bacterias hidrolíticas y fermentativas, como ácidos de cadena larga, ácidos orgánicos y compuestos aromáticos hasta acetato, dióxido de carbono e hidrógeno.
<b>Bacterias aerobias:</b>	Microorganismos que pueden vivir y desarrollarse en ambientes donde existe oxígeno diatómico.
<b>Bacterias anaerobias:</b>	Bacterias que no viven ni proliferan en presencia de oxígeno.
<b>Bacterias facultativas:</b>	Bacterias que pueden vivir bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas.
<b>Bacterias fermentativas:</b>	Bacterias que utilizan como fuente de energía los productos derivados de las bacterias hidrolíticas y son las encargadas de continuar el proceso.

<b>Bacterias hidrolíticas:</b>	Son las encargadas de romper los enlaces iónicos de los compuestos más complejos tales como proteínas, lípidos y carbohidratos mediante una acción enzimática.
<b>Bacterias metanogénicas:</b>	Grupo especializado de bacterias anaerobias obligadas que descomponen la materia orgánica y forma metano.
<b>Cama de ganado:</b>	Se aplica al montón de paja o juncos que suele haber en los corrales donde permanece el ganado.
<b>Elución:</b>	Extracción de una sustancia absorbida desde un lecho poroso o columna de cromatografía disolvente adecuada.
<b>Ensilado:</b>	Producto final de un proceso fermentativo “controlado” de un forraje húmedo, el proceso por el cual se obtiene se denomina silaje.
<b>Estabulación:</b>	Proviene de la palabra establo, consiste en mantener a los animales que se crían dentro de un establo.
<b>Fermentación entérica:</b>	Proceso digestivo por medio del cual los microorganismos descomponen los carbohidratos en moléculas simples para la absorción hacia el torrente sanguíneo de un animal. Durante este proceso se producen grandes cantidades de emisiones de metano.
<b>Gramíneas:</b>	Familia de plantas angiospermas monocotiledóneas de tallo cilíndrico nudoso y generalmente hueco, hojas sentadas, largas y estrechas e insertas al nivel de los nudos, flores dispuestas en espiguillas reunidas en espigas, racimos o panículas y semillas ricas en albumen.
<b>Leguminosas:</b>	Familia del orden de las fabales, reúne árboles, arbustos y hierbas perennes o anuales, fácilmente reconocibles por su fruto tipo legumbre y sus hojas compuestas y estipuladas.
<b>Monómero:</b>	Es una molécula de pequeña masa molecular que unida a otros monómeros, a veces cientos o miles, por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, forman macromoléculas llamadas polímeros. Los aminoácidos son

los monómeros de las proteínas. Los nucleótidos son los monómeros de los ácidos nucleicos. Los monosacáridos son los monómeros de los polisacáridos. Los ácidos grasos son los monómeros de los lípidos.

**Palatabilidad:**

Grado de apetencia de un alimento por el ganado.

**Salinidad:**

Suelo con exceso de sales solubles en agua, la sal dominante en general es el cloruro de sodio (NaCl), razón por la cual tal suelo también se llama suelo salino-sódico.

**Siloxanos:**

Grupo de compuestos que contienen silicio, oxígeno e hidrógeno.

**$\beta$ -oxidación:**

Proceso catabólico de los ácidos grasos en el cual sufren remoción, mediante la oxidación, de un par de átomos de carbono sucesivamente en cada ciclo del proceso, hasta que el ácido graso se descompone por completo en forma de moléculas acetil-CoA.

# CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

A partir de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano en 1972 en Estocolmo, ha crecido la conciencia sobre el deterioro del medio ambiente y sus consecuencias, en la Cumbre de La Tierra en Río de Janeiro en 1992 la mayoría de los Jefes de Estado se sintieron comprometidos con la problemática del medio ambiente. El informe “Nuestro Futuro Común” presentado en 1987 por la Comisión Brundtland introdujo el término de “*desarrollo sostenible*” el cual se convirtió en la base de cinco documentos de acuerdo de la Cumbre de la Tierra. Después de la Conferencia de Río, el concepto de desarrollo sostenible se ha vuelto fundamental a nivel nacional e internacional y se define como aquel que “*satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades*” (López A., 2009), en 1997 surge el protocolo de Kioto como un acuerdo internacional en el ámbito de las Naciones Unidas, que trata de frenar el cambio climático de origen antropogénico, siendo uno de los objetivos principales la reducción de emisiones de los gases que aceleran el calentamiento global. El mismo Protocolo considera como gases de efecto invernadero (GEI) al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), y al óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que contribuyen con el 50, 18 y 6% respectivamente a nivel mundial por actividades humanas (Ramírez, 2010).

Ramírez (2010), menciona que los procesos agrícolas como el cultivo de arroz inundado en agua, la fermentación entérica en los animales y la descomposición de los desechos de éstos, emiten CH<sub>4</sub>; se estima que 470 millones de TM/año ingresan a la atmósfera por actividades antropogénicas de los cuales el 17% corresponde a actividades ganaderas; según las predicciones se estima que para el año 2100 esta cantidad de CH<sub>4</sub> liberado se incremente en un 120%.

La implementación de un esquema de desarrollo sostenible en la agricultura, según López (2009), está relacionado con las dificultades conceptuales y con la falta de metodologías operacionales. La agricultura sostenible abarca varios ámbitos, como la

preservación de recursos naturales, tecnologías limpias, tecnologías de bajo costo con el mínimo uso de insumos industriales, cultivos orgánicos, etc.

González y Sandoval (2005), mencionan que la cría y engorde de bovinos para la producción de carne y leche, está ocasionando graves problemas medio ambientales y sanitarios. Si bien, esta actividad viene realizándose desde hace siglos atrás, donde el medio ambiente era capaz de soportar la descarga de residuos provenientes de la actividad ganadera, actualmente la producción debido a la demanda, se ha intensificado de tal manera, que se ha desatado una verdadera preocupación ambiental.

La correcta disposición de excretas bovinas es uno de los factores limitantes en los procesos de producción animal en haciendas y fincas lecheras, debido a la generación de gran cantidad de materia fecal, especialmente durante el proceso de ordeño (Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008).

La finca “Rancho Santa Esther”, actualmente, no cuenta con un sistema de recolección de estiércol bovino, por lo que el momento de lavar los establos y ante la presencia de precipitaciones, todo el desecho es arrastrado hacia la acequia que pasa por dicha Finca, y que abastece todas las necesidades del mismo, lo que se convierte en un problema de contaminación ambiental y constituye un verdadero peligro para los animales, cultivos y los seres humanos.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.**

La producción de leche en la Comunidad Andina (Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú), alcanzó durante el período 2000-2006 las 8 713 000 TM en promedio, con un ritmo de crecimiento anual del 2,8%, superior a la tasa de crecimiento poblacional humano que es de 1,52%. El principal productor en la sub-región es Colombia con el 57%; en segundo lugar está Ecuador con un 26% seguido de Perú con el 14% y Bolivia 3% (Torres, 2009).

Según el último censo agropecuario, el Ecuador cuenta con 5,5 millones de cabezas de ganado (MAGAP, 2012), de los cuales 0,9% corresponden a ganado pura sangre

de leche, 1,4% a ganado mestizo con registro, 42,4% a ganado mestizo sin registro y 54,1% a ganado criollo (Agroecuador, 2011).

Expertos nacionales y extranjeros han establecido que las mesetas de la provincia del Carchi constituyen zonas óptimas para la crianza de ganado, tanto de carne como de leche aportando el 4,78% de la producción de leche en el total nacional (Agroecuador, 2011). El cantón Tulcán es el de mayor superficie dedicada a pastos y también el de mayor población bovina (Torres, 2009).

La finca “Rancho Santa Esther” propiedad del señor José María Acosta Yépez, desde los años 50 se ha caracterizado por ser una finca productora de papas y leche, cuenta con una extensión de 56 hectáreas; cuatro de ellas sembradas con papas y el resto con pasto. Actualmente, cuenta con 98 animales, de los cuales, 18 son terneras, 25 vacas y 55 vacas, de estas 36 son lecheras y su ordeño se lo realiza dos veces por día. A fin de mantener la asepsia durante este proceso, se debe lavar el potrero antes y después de la salida de los animales, durante todo este tiempo el manejo del estiércol generado en este proceso ha sido de manera tradicional, es decir, que han sido enviados a la acequia, sin ningún tratamiento previo, lo que se ha constituido en un verdadero problema ambiental y de salud, pues la acequia es la encargada de dotar de agua no solo a la finca “Rancho Santa Esther” sino a otras fincas por las que pasa este canal.

Hoy en día existe una creciente preocupación por los efectos al medio ambiente, generados por la descarga de residuos provenientes de la actividad ganadera, de ahí que la FAO propone un prototipo denominado “*Biodigestor plástico de flujo continuo, generador de gas y bioabono a partir de aguas servidas*”, el cual resulta económico y viable para las regiones rurales (FAO, 1992).

Ecuador, no se ha quedado atrás en el tema legislativo y en la actualidad, existe mayor control ambiental por parte del Ministerio del Ambiente con la *LEY FORESTAL Y DE CONSERVACIÓN DE ÁREAS NATURALES Y VIDA SILVESTRE* y la *LEY DE LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN*; sumado al reajuste de costosas multas al contaminar las aguas de los ríos y la tala de árboles para consumo de leña,

impulsando así la necesidad de generar una fuente alterna de energía y calor, que disminuya costos de producción de la Finca (Ministerio del Ambiente , 2004).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y mirando las necesidades en particular de la Finca “Rancho Santa Esther”, se propuso diseñar, construir e implantar un digestor anaerobio de flujo continuo, con ciertas modificaciones a lo que la FAO recomienda, debido a que, como lo expone CEDECAP-GREEN EMPOWERMENT (2009), los biodigestores de polietileno poseen escasa resistencia a la radiación solar, degradándose rápidamente incluso en menos de un año si es expuesto directamente al sol. El polietileno no permite operaciones de soldadura o pegado, obligando así a las operaciones de amarre de los tubos de carga y descarga mediante ligas de neumáticos; haciendo que la manipulación pueda llevar a errores de instalación como rupturas en el plástico, deformación de las tuberías de carga y descarga por exceso de tensión de las ligas de neumáticos, etc; debido a su forma se hace muy complejo el control de temperatura y pH dentro del digestor, al ser un material frágil, existen riesgos en su transporte e instalación, finalmente no es sencillo parchar eventuales huecos en el material.

*“Se considera que el uso de polietileno para biodigestores tubulares ha cumplido una misión de vanguardia, frente a modelos rígidos en concreto y ladrillos; pero los inconvenientes que presenta causan un alto número de rupturas y abandono de los sistemas, disminuyendo su vida media útil y así disminuyendo la rentabilidad de la inversión económica”* (CEDECAP-GREEN EMPOWERMENT, 2009).

### **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.**

#### **1.3.1 Objetivo principal.**

Diseñar, construir e implantar un digestor anaerobio de flujo continuo, para tratamiento de estiércol bovino en la Finca “Rancho Santa Esther” del sector “La Delicia” parroquia Tulcán, cantón Tulcán, provincia del Cachi- Ecuador.

### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Emplear los parámetros de diseño pre-establecidos para diseñar el digestor anaerobio.
- Estimar la cantidad de biogás que podría generar el digestor anaerobio.
- Realizar el ensamblaje, estabilización y operación del digestor anaerobio.
- Controlar los parámetros de operación que han sido determinados para un adecuado funcionamiento del digestor anaerobio.
- Comprobar el funcionamiento y la eficiencia del sistema a través de análisis físico-químicos y microbiológicos del biofertilizante obtenido.
- Validar el volumen de biogás obtenido sobre la base de análisis estadísticos exploratorios e inferenciales.

## **1.4 MARCO TEÓRICO.**

### **1.4.1 Aspectos generales.**

La palabra biogás se remonta a los años 1 600, época en la que los científicos lo identificaron como gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica (Hilbert, 2003).

En 1890 se construye el primer biodigestor en la India, en 1896 en Exeter-Inglaterra se fermentaban los lodos cloacales, los cuales eran puestos en biodigestores para producir biogás, que era utilizado en las lámparas de alumbrado público, mientras que en 1914 durante la primera guerra mundial se utilizaba el biogás producido para el funcionamiento de plantas, vehículos y hasta se inyectó en la red del gas comunal. Más tarde durante los años de la segunda guerra mundial, se difundieron los biodigestores en toda Europa, China e India (Hilbert, 2003).

Durante la revolución industrial sucedida entre los siglos XVII al XIX, el uso de gas proveniente de biodigestores, se vio disminuido; sin embargo, en la década de los '70 se reanudó el interés en esta fuente de energía, en conjunto con la investigación de los

microorganismos que intervienen en condiciones anaerobias, todo esto acompañado de avances tecnológicos en este campo (Hilbert, 2003).

Actualmente, los principales generadores de biodigestores son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, Estados Unidos, Filipinas y Alemania, donde diferentes aplicaciones se han generado alrededor de la digestión anaerobia, en tratamiento de agua, residuos industriales, residuos rurales con desechos de animales, rellenos sanitarios y tratamiento de líquidos cloacales (Hilbert, 2003).

En países como Chile, Colombia, Perú, Costa Rica, Honduras, Guatemala, se han desarrollado varios proyectos para implementar biodigestores (Acosta, 2011), así por ejemplo, en Bolivia se ha generado programas de capacitación para la construcción de biodigestores de polietileno tubular para toda la zona del páramo (Martí A, 2008).

En Ecuador desde hace algunos años se viene trabajando con proyectos que buscan generar energía alternativa, principalmente en los páramos donde incluso es difícil tener acceso a la energía eléctrica normal. Así por ejemplo, la Fundación “Brethren y Unida”, ha puesto en marcha varios proyectos para la generación de energías alternativas en conjunto con la comunidad (Fundación Brethren Unida, 2011), más proyectos como este, se han generando entre los años 2004 a 2006 por parte de la Corporación para la Investigación Energética en Nono y Bolívar (Corporación para la Investigación Energética, 2011), sumados a investigaciones sobre biodigestores y combinaciones de desechos para digestión anaerobia, han sido puestos en marcha por parte de las Universidades como la Pontificia Universidad Católica, Escuela Politécnica Nacional, Escuela Politécnica del Litoral (Acosta, 2011), Unidad Académica Ciencias de la Ingeniería. (Bravo & Cosquillo, 2011), Universidad Técnica del Norte (Domínguez, Granja, Guachagmira, & Robalino, 2010) y Escuela Politécnica del Ejército.

## **1.4.2 Conceptos Generales.**

### **1.4.2.1 Ganado bovino en el Ecuador.**

Se estima que en el Ecuador existen 5,5 millones de cabezas de ganado vacuno, existen cuatro razas que son las más vendidas, estas son Jersey, Holstein, Normando y Swiss Roja. La raza vacuna más popular en la Sierra Ecuatoriana es la Holstein, ya que es la que mejores lácteos brinda y es la más económica al momento de adquirirse, además el contenido de grasas es muy bajo, esta raza se cría principalmente en las provincias de la Sierra, por su adaptación a climas fríos (INEC, 2002) (MAGAP, 2012).

### **1.4.2.2 Alimento del ganado vacuno.**

Como lo menciona Bernal (2005), las pasturas cultivadas son la base de la alimentación de la ganadería al pastoreo, ya sea a nivel de valles interandinos o en zonas alto andinas y se las considera como la herramienta principal para manipular la producción en la explotación, porque son la fuente de alimento más barata que existe; al asociar gramíneas con leguminosas proveen un alimento completo y balanceado al ganado es decir obteniendo energía y proteína a la vez; el manejo adecuado como por ejemplo, el sistema de “pastoreo controlado” o el pastoreo rotacional, permite optimizar el uso de este recurso incrementando su productividad y su perennidad.

#### **- Gramíneas.**

Son la principal fuente de alimento en campos de pastoreo. Se usan diferentes especies de gramíneas en las mezclas, dependiendo de las condiciones climáticas y de los requerimientos de producción. Las principales gramíneas usadas son los Rye Grasses también conocidas como ballicas, *Dactylis*, *Festuca*, *Bromus* y *Phalaris* (Bernal, 2005).

- ***Ballica Nui***. Se cultiva esta especie de gramínea, debido a que es de rápida germinación (5-7 días) posee resistencia al pisoteo, tiene tolerancia a la salinidad, resistente al frío a veranos secos. Algo interesante es que tiene el potencial de producir gran cantidad de biomasa de buena calidad y apetecible para el ganado (Demanet, 2007).

- **Rye Grass Perenne.** Crece en regiones con un adecuado régimen de precipitación (600 m.s.n.m) o con disponibilidad de riego, usado por su rápido establecimiento, alta producción, valor nutritivo y persistencia bajo condiciones de pastoreo severo. Los rye grasses perennes toleran temperaturas extremas (>25°C) (Bernal, 2005).
- **Leguminosas.**

Las mejores pasturas son aquellas en que las leguminosas están asociadas con las gramíneas, los nódulos de las raíces de las leguminosas fijan nitrógeno atmosféricos en el suelo y donde eventualmente se hace disponible a las gramíneas; asegurando un mayor y suculento crecimiento de éstas. Las pasturas de clima templado el trébol blanco y el trébol rojo son las leguminosas más usadas en pasturas pastoreadas (Bernal, 2005).

- **Trébol blanco.** Esta leguminosa es sembrada, debido a que, como Bernal (2005) lo describe posee poca sensibilidad a temperaturas bajas, aumenta el valor alimenticio de un establo que posea Rye Grass, ya que produce altos niveles de proteína digestible, alto contenido mineral, alta palatabilidad y facilita la digestibilidad.
- **Trébol rojo/rosado.** Tiene un alto valor nutritivo y se produce predominantemente en verano. Hay variedades que están adaptadas a la defoliación frecuente y se pueden incluir dentro de una mezcla permanente para generar una alta producción en verano, que deben pastorearse con bajas cargas para permitir su persistencia (Bernal, 2005).

- **Otras hierbas.**

- **Llantén forrajero.** Para completar la mezcla de forraje se utiliza también el llantén que es propio de la zona andina, crece en terrenos secos, es una planta sin tallos ramificados, que alcanzan los 30 a 50 cm de altura (Demanet, 2007).

### 1.4.2.3 Estiércol /excretas/purines.

Sierra & Rojas (2010), definen estiércol como las deyecciones sólidas de los animales, mientras que los purines son una mezcla de orina, estiércol y agua de lavado. García (2000) menciona que la composición química del estiércol cualquiera sea la especie depende de las proporciones de los distintos ingredientes de la dieta y su contenido respectivo de nutrimentos; de algunos aditivos como las enzimas, del procesamiento del alimento y la cantidad de alimento consumido; así como de la biodisponibilidad de aminoácidos y de minerales. Además, la relación C/N puede variar como lo explica Ganadero (2007), debido al tipo de instalaciones en las que se encuentren los animales, el tipo de manejo del ganado y la duración del almacenamiento del estiércol ya que se produce pérdidas de nitrógeno y también de humedad debido al secado.

A continuación se describe de una manera breve las características de las diferentes excretas animales: estiércol de cerdo, estiércol equino, estiércol ovino y gallinaza.

- **Estiércol de cerdo.** El alimento casi siempre acuoso que se da al cerdo hace que igualmente su estiércol tenga una gran cantidad de agua, por este motivo, se le clasifica entre los abonos frescos. Generalmente al ser alimentados con granos, papas, restos de maleza, sobras de la cocina, etc, hace que su estiércol sea muy bueno para procesos de degradación anaerobia con producción de gas. El estiércol de cerdo con frecuencia contiene altas concentraciones de Cu y Zn comparado con heces de otras especies, debido a que el Cu se adiciona a las raciones, con el fin de aumentar las ganancias de peso y la conversión alimentaria de cerdos de engorde, mientras que el Zn se utiliza para contrarrestar el potencial de toxicidad del Cu, sin embargo la presencia de estos dos minerales es beneficioso para su uso como abono en los cultivos (García A., 2000).
- **Estiércol equino.** Es pajoso conviene particularmente a los terrenos fríos y pegajosos. Es menos útil a los suelos ligeros y arenosos. Este estiércol entra muy fácilmente en fermentación. Sin embargo es necesario regarlo continuamente para

que no se consuma por su propio calor. Su naturaleza ardiente lo hace emplear muchas veces en establecimiento de los criaderos. Una práctica muy ventajosa es la de mezclarlo con el estiércol de cerdo haciéndolo perder de esta manera una buena parte de las tendencias que tiene a quemarse (Ochoa, 2009).

- **Estiércol ovino.** Este es uno de los abonos más activos, lo que lo hace ventajoso en los suelos fuertes y fríos, a los mismos que favorece desecándolos. El riego del estiércol puede aún practicarse largo tiempo después de la siembra, si el suelo no es demasiado compacto o muy húmedo. No es muy común su uso como generador de gas (Ochoa, 2009).
- **Estiércol de gallina/gallinaza.** La gallinaza se compone de una mezcla de deyecciones, plumas, residuos de alimento y huevos rotos que se caen al piso y se mezclan, este tipo de gallinaza tiene un alto contenido de nitrógeno, que se volatiliza rápidamente creando malos olores, por lo que es necesario someterla a un proceso de secado. Durante la deshidratación, se produce un proceso de fermentación aeróbica, que genera nitrógeno orgánico y es más estable (Estrada M., 2005). El excremento de los pollos es de naturaleza ligno-celulósica debido a que se alimentan ordinariamente de granos, las gallinas comen también insectos y lombrices, lo que hace que los excrementos de estas aves constituyan uno de los estiércoles más activos cuyos efectos son pronto y útiles a toda especie de cosecha. La degradación, de este tipo de estiércol es muy difícil, por lo que se recomienda la mezcla con estiércol bovino para que pueda actuar como generador de gas (Carballas, 1999).

#### **1.4.2.4 Estiércol bovino.**

Se encuentra formado por la mezcla de las deyecciones y la cama del ganado, se caracteriza por sufrir una fermentación importante, tanto en el establo o el lugar destinado para almacenarlo debido al alto contenido de bacterias metanogénicas (Jarauta, 2005). Este estiércol es el más importante y uno de los que se produce en mayor cantidad en las explotaciones rurales como se observa en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1. Producción de estiércol fresco diario.<sup>1</sup>**

<b>Ganado</b>	<b>kg de estiércol fresco producido por cada 100 kg de peso del animal</b>
Cerdo	4
<b>Bovino</b>	<b>7</b>
Caprino	4
Conejo	3
Equino	7
Humano Adulto	0,4 kg por adulto
Humano niño	0,2 kg por niño

Fuente: (Martí J., 2008).

Utilizado históricamente por los agricultores directamente como abono en los cultivos, conveniente a todas las plantas y a todos los suelos, da consistencia a la tierra arenosa y móvil, ligereza al terreno gredoso y refresca los suelos cálidos, calizos y margosos, sin embargo diversas investigaciones indican que la aplicación de estiércol como abono podría modificar las propiedades físicas de los suelos como la salinidad, pero si su uso es indiscriminado podría terminar perjudicando al suelo. A continuación la Tabla 1.2, muestra una comparación entre los nutrientes encontrados en el estiércol bovino con otros (Carballas, 1999).

**Tabla 1.2. Composición promedio de nutrientes esperadas de estiércol bovino fresco en comparación con otras especies de animales.**

Constituyente	<b>BOVINO</b>	Equino	Ovino	Porcino	Pollo
	%				
N <sub>2</sub>	<b>0,53</b>	0,55	0,89	0,63	0,89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>0,29</b>	0,27	0,48	0,46	0,48

<sup>1</sup> Si una vaca pesa 300 kg (3\*7=21) producirá 21kg de estiércol fresco

Continúa...

K <sub>2</sub> O	<b>0,48</b>	0,57	0,83	0,41	0,83
Ca	<b>0,29</b>	0,27	0,21	0,19	0,38
Mg	<b>0,11</b>	0,11	0,13	0,03	0,13
Cu	<b>0,00079</b>	0,00079	0,00079	0,00016	0,0006
Mn	<b>0,003</b>	0,003	0,003	0,0008	0,003
Zn	<b>0,0016</b>	0,002	0,002	0,0006	0,0021
Cl <sub>2</sub>	<b>0,03</b>	0,08	0,08	0,03	0,08
S	<b>0,036</b>	0,036	0,06	0,03	0,06
B	<b>0,016</b>	0,016	0,016	0,0005	0,016
Materia Orgánica	<b>16,74</b>	27,06	30,7	15,5	30,7
Humedad	<b>81,33</b>	68,85	64,82	77,56	64,80
Ceniza	<b>2,06</b>	6,70	4,72	6,02	4,72

Fuente: (Sierra & Rojas, 2010).

La Tabla 1.3 muestra la relación C/N entre el estiércol bovino y otras razas de animales (Carballas, 1999).

**Tabla 1.3. Relación del contenido de nitrógeno y carbono en estiércol bovino comparado con otras razas de animales.**

Tipo de Estiércol	Carbono	Nitrógeno	C/N
	%		
<b>Vacuno</b>	<b>7</b>	<b>0,5</b>	<b>15</b>
Ave	15	1,5	10
Cerdo	8	0,7	12
Oveja	16	0,8	20
Equino	15	0,5	30
Harina de sangre	35	1,5	2

Fuente: (Sierra & Rojas, 2010).

#### **1.4.2.5 Aplicaciones del estiércol.**

- ***Uso específico de estiércol de cerdo como alimento para rumiantes.***

No es una práctica nueva pues se tiene conocimiento que los chinos lo vienen realizando desde hace unos 3000 años, sin embargo el uso de excretas porcinas parece tener éxito solo con los rumiantes, debido a que su flora produce las enzimas necesarias para digerir los nutrimentos que contienen las excretas (García A., 2000).

García (2000) cita a Henning y Flachowsky (1982), quienes justifican el uso de excretas de cerdo como alimento para rumiantes, al considerar que es una fuente de fibra para los concentrados y la fracción de nitrógeno no proteico aprovechable es del 70% en comparación con la que se absorbe de las plantas que tan solo llega a un 2%; por lo tanto su valor alimenticio y el menor costo que representa lo hacen apetecido como alimento para el ganado rumiante preferentemente de carne.

- ***Uso de estiércol como fertilizante.***

Esto se enfoca principalmente en la aplicación directa sobre el suelo, sin embargo la reutilización de N, P y K en la producción vegetal, puede llegar a ser imposible debido a lo limitado de las áreas de tierra disponibles concentrando cantidades excesivas de N, lo que resulta una amenaza para el ambiente. Además no es muy recomendable pues en el caso del estiércol de cerdo el fuerte olor emitido durante su almacenamiento y esparcimiento pueden volverse una verdadera molestia, eliminando al aire CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, amoníaco, NO<sub>x</sub> y otros gases, lo que contribuye al efecto invernadero del planeta (García A., 2000).

- ***Utilización de estiércol como compost.***

En los últimos años se ha implementado un sistema llamado “cerdos criados sobre cama o composta *in situ*”, que consiste en criar a los cerdos en establos con un piso cubierto por aproximadamente 30 cm de aserrín y una mezcla de un producto comercial bacteriano; esta cama permanece durante todo el período de crianza, el producto final

contiene grandes cantidades de materia orgánica, N, P, K y elementos trazas, que luego de un tiempo de espera estará libre de patógenos listo para ser aplicado en el suelo (López A.,2009).

#### **1.4.2.6 Aprovechamiento del excremento en la producción de biogás.**

La digestión anaerobia como bien se ha mencionado es una tecnología ampliamente conocida y utilizada desde hace muchos años, en donde la materia orgánica es transformada en gas metano, que puede ser utilizado como combustible y suplir parte de los requerimientos del lugar donde se necesite (Pérez, 2010).

Sin embargo el aprovechamiento de metano a partir de excretas de rumiantes y no rumiantes para la generación de energía, requiere establecer condiciones de temperatura y humedad para tener un proceso eficiente, además de un complejo control microbiano (Pérez, 2010).

Ramírez (2010), en la publicación titulada “*Emisiones de metano generadas por excretas de animales de granja y contenido ruminal de bovino*” realizó un estudio comparativo de biogás total y metano producido por fermentación de excretas de ganado vacuno de engorde y lechero, porcino, borrego, cabra y aves de corral de postura a temperatura ambiente; mediante el cual pudo concluir, que luego de 72 horas de fermentación las muestras de menor a mayor producción de CH<sub>4</sub> fueron gallinaza con 1,5%, estiércol de ganado de engorde con 18,7%, estiércol de ganado lechero con 23,2%, excretas de borrego con 33,2%, excretas de cabra con 33,84% y finalmente estiércol de cerdo con 46,34%.

Robalino (2008), en la publicación “*Estudio comparativo y aplicación de materia prima alternativa en biodigestores unifamiliares de flujo continuo en la Zona de Intag. Cotacachi-Imbabura*”, comparó la producción de biogás. Con la utilización de materia prima alternativa, excretas sólidas y líquidas del hombre frente a la materia fecal de cerdos, concluyendo que luego de tres meses de estudio el digestor con excretas humanas más excretas de cerdo presentaron un 61,55% de metano, mientras que el digestor solo con

excretas de cerdo registró un 64,23%, considerando que no existe mayor diferencia entre ellos.

En el estudio “Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos” Sogari (2003), realizó pruebas con excremento de vaca, excremento de cerdo y mezcla de restos de ensilado y maíz, con lo cual pudo concluir, que la velocidad de generación de gas fue mayor al usar estiércol de cerdo, además obtuvo 85 Litros de metano con excremento de vaca, 110 Litros con excremento de cerdo y 135 Litros con la mezcla de restos de ensilado y maíz.

#### 1.4.2.7 Biogás.

Es un gas producto de la degradación anaeróbica de materia orgánica en una cámara hermética. Realmente es la combinación de varios gases, dióxido de carbono (20-30%), nitrógeno molecular (2-3%), ácido sulfhídrico (0,5-2%) y metano (60-80%), siendo una mezcla combustible siempre y cuando el contenido de este último componente sea mayor al 50%. En la Tabla 1.4 se muestran las propiedades de un tipo estándar de biogás (Martí,2008).

**Tabla 1.4. Propiedades de una composición estándar de biogás.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Energía contenida	kWh/m <sup>3</sup>	6,0 – 6,5
Equivalente en combustible	Litros petróleo/m <sup>3</sup> biogás	0,6 – 0,65
Límite de explosión	% Biogás en el aire	6 – 12
Temperatura de ignición	°C	650 – 750
Presión crítica	Bares	75 – 89
Temperatura critica	°C	-82,5
Densidad normal	kg/m <sup>3</sup>	1,2
Olor	-----	Huevos en mal estado
Masa molar	kg/kmol	16,04

Fuente: (Pérez, 2010).

Un poco más liviano que el aire; el biogás puede ser utilizado como cualquier otro combustible, tanto para la cocción de alimentos, en sustitución de la leña, el queroseno, el gas licuado, etc. Así como para el alumbrado, mediante lámparas adaptadas; mezclas de

biogás con aire, con una relación 1:20, forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados, en la Tabla 1.5 se compara al biogás entre diferentes gases utilizados por su poder calórico (Bravo & Cosquillo, 2011).

**Tabla 1.5. Tabla comparativa entre diferentes gases.**

<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S</b>	<b>Otros</b>	<b>Biogás</b>
Proporciones Volumen	%	55-75	27-44	1	3	<b>100</b>
Valor Calórico	MJ/m <sup>3</sup>	35,8	-----	10,8	22	<b>21,5</b>
	kcal/m <sup>3</sup>	8600	-----	2581	5258	<b>5140</b>
Ignición	% en aire	5-15	-----	-----	-----	<b>6-12</b>
Temp. de Ignición	°C	650-750	-----	-----	-----	<b>650-750</b>
Presión crítica	MPa	4,7	7,5	1,2	8,9	<b>7,5-8,9</b>
Densidad nominal	g/L	0,7	1.9	0,008	-----	<b>1.2</b>
Inflamabilidad	% aire	<b>5-15</b>	-----	-----	-----	<b>6-12</b>

Fuente: (Bravo & Cosquillo, 2011)

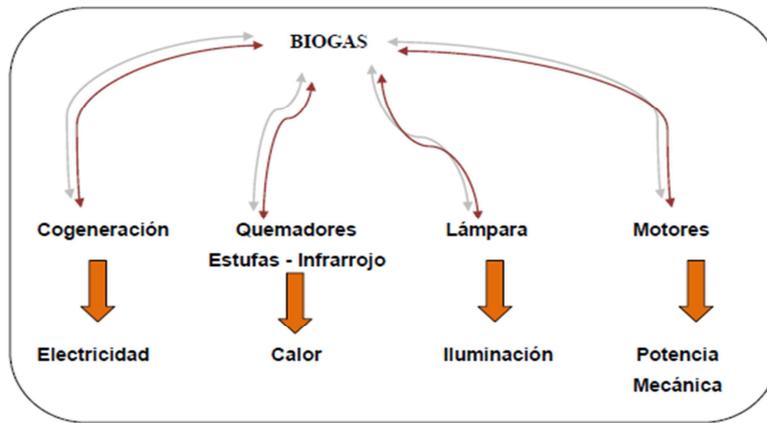
El biogás producido se emplea normalmente como sustituto de la leña, bosta seca o gas licuado de petróleo (GLP), para cocinar. El poder calorífico del biogás es menor al del butano o propano, e implica que se tarda en cocer más tiempo los alimentos que cuando se hace con gas natural. El consumo de una cocina domestica normal se puede estimar en 130-170 litros por hora (Martí, 2008).

**Tabla 1.6. Equivalencias energéticas del biogás.**

<b>1000 Litros (1 m3) de biogás equivale a :</b>		
Madera	kg	1,3
Alcohol	Litros	1,1
Gasolina	Litros	0,8
Carbón	kg	1,5
Electricidad	kW/h	2,2

Fuente: (Martí, 2008).

Bravo & Cosquillo (2011) presenta la Figura 1.1 con los posibles usos y aplicaciones del biogás:



**Figura 1.1. Aplicaciones del biogás**

Fuente: (Bravo & Cosquillo, 2011).

- **Componentes presentes en el biogás y sus efectos.**

Los componentes más comunes que se encuentran presentes en el biogás son: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, Vapor de agua, Polvo, N<sub>2</sub> y Siloxanos. La Tabla 1.7 muestra un resumen de los efectos en el comportamiento del biogás.

**Tabla 1.7. Componentes del biogás y su efecto en las propiedades.**

Componente	Unidad	Valor	Efecto
CO <sub>2</sub>	% vol	25 - 50	Baja el poder calorífico
			Incrementa el número de metano
			Causa corrosión
			Daña celdas alcalinas de combustible
H <sub>2</sub> S	% vol	0 - 0,5	Corrosión en equipos y tuberías
			Emisiones de SO <sub>2</sub> después de los quemadores
			Emisión de H <sub>2</sub> S en combustión imperfecta

Continúa...

<b>NH<sub>3</sub></b>	% vol	0 - 0,5	Emisión de NOx
			Daño en las celdas de combustibles
<b>Vapoor de Agua</b>	% vol	1 - 5	Daños en la celda de combustibles
			Corrosión en equipos y tuberías
			Daños de instrumentación por condensado
			Riesgo de congelar y bloquear tuberías y válvulas
<b>Polvo</b>	µm	> 5	Bloquea las boquillas y celdas combustibles
<b>N<sub>2</sub></b>	% vol	0 – 5	Baja el poder calorífico
<b>Silóxanos</b>	mg/m <sup>3</sup>	0 – 50	Actúan como abrasivos, daños en motores

Fuente: (Pérez, 2010).

- *Efectos del CO<sub>2</sub> en el biogás.* Se mide en la razón de CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (%vol.) y puede ser controlada parcialmente debido a que es esencial en la formación de metano en el gas por lo que no se busca hacerlo desaparecer (Pérez, 2010).

Los factores que influyen la composición de CO<sub>2</sub> son:

- La presencia de compuestos con largas cadenas de hidrocarburos por ejemplo compuestos con alto contenido en grasas ayudan a mejorar la calidad del gas cuidando de no afectar la acidez, la cantidad de átomos de Carbono presentes en el sustrato se relaciona directamente con el porcentaje en volumen de metano presente en el biogás (Pérez, 2010).
- Generalmente la descomposición anaeróbica de la biomasa mejora con el tiempo de exposición, cercano el final del tiempo de residencia el contenido de metano aumenta desproporcionadamente a medida que el contenido de CO<sub>2</sub> va desactivando el proceso de hidrólisis (Pérez, 2010).
- El proceso de fermentación toma lugar de manera más rápida si el material en el reactor está distribuido homogéneamente (Pérez, 2010).

- Un alto contenido de líquido en el reactor influye en una alta concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en el agua, lo que disminuye el nivel de CO<sub>2</sub> presente en la fase gaseosa (Pérez, 2010).
- A mayor temperatura de fermentación, disminuye la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto en el agua (Pérez, 2010).
- Una alta presión durante el proceso lleva a una mayor concentración de CO<sub>2</sub> presente en el agua, esto se puede aprovechar si se purga material con alto contenido en CO<sub>2</sub> disuelto en el agua (claramente una vez iniciado el proceso de proliferación bacteriana) (Pérez, 2010).

- *N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> presentes en el biogás.* Se encuentran normalmente en proporción 4:1 y usualmente se incorporan en las etapas de ventilación que tienen como objetivo eliminar el ácido sulfhídrico presente en el reactor, estos gases pueden entrar también normalmente en pequeñas cantidades si el sistema de tuberías no está perfectamente hermético (Pérez, 2010).

- *Amoniaco presente en el biogás.* Pérez (2010), menciona que normalmente la concentración de amoniaco es baja (<0,1 mg/m<sup>3</sup>), en ciertos casos puede llegar a 1,5mg/m<sup>3</sup>, por sobre este límite existe riesgo para los quemadores inclusive para la vida de los motores utilizados.

- *Ácido sulfhídrico presente en el biogás.* La cantidad depende principalmente del proceso utilizado para la obtención del biogás y del tipo de sustrato involucrado, si no existe un caso de desulfurización, la concentración de H<sub>2</sub>S puede exceder el 0,2% vol. Cuando el sustrato fermentado es viscoso el contenido de H<sub>2</sub>S es menor que en el caso de un sustrato líquido (Pérez, 2010).

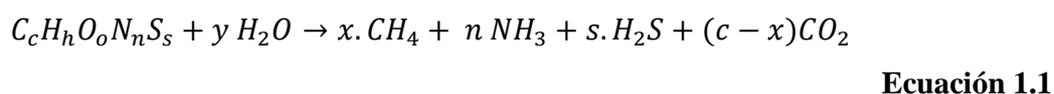
El sulfuro de hidrógeno contenido en el biogás, junto a la humedad de éste, se convierte en ácido sulfúrico, el cual es nocivo para ciertos equipos como calentadores de agua, motores o refrigeradores. Por lo tanto, la reducción del sulfuro de hidrógeno se hace

necesaria cuando el biogás presenta sobre 2% en volumen de este compuesto. Sin embargo, la desulfuración no es necesaria si el biogás contiene menos del 1% de este compuesto (Pérez, 2010).

- *Siloxanos presentes en el biogás.* Son variantes de la silicona y se presentan como grupos separados en el biogás, estos componentes pueden ser hallados principalmente en cosméticos, detergentes, tintas de impresión y en materiales de construcción por lo que es común encontrarlo en los desechos domésticos (Pérez, 2010).

- **Reacciones bioquímicas en la generación del biogás.**

Según Pérez (2010), la producción de metano responde a la siguiente Ecuación 1.1:



Con:

$$x = \frac{1}{8}(4c + h - 20 - 3n - 2s)$$

**Ecuación 1.2**

$$y = \frac{1}{4}(4c - h - 20 + 3n + 3s)$$

**Ecuación 1.3**

Los productos generalmente obtenidos en las reacciones en la generación de biogás son, carbohidratos, grasas, proteínas, se observan en la Tabla 1.8.

**Tabla 1.8. Productos en la generación de biogás.**

<b>Carbohidratos</b>	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$
<b>Grasas</b>	$C_{12}H_{24}O_6 + 3 H_2O \rightarrow 4,5CO_2 + 7,5 CH_4$
<b>Proteínas</b>	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6 H_2O \rightarrow 6,5 CO_2 + 6,5 CH_4 + 3NH_3 + H_2S$

Fuente: (Pérez, 2010).

En términos generales Pérez (2010) menciona que la materia orgánica junto con el agua genera  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$  y  $CO_2$  sin embargo el  $CO_2$  se une con el  $NH_3$  y los sulfuros

permanecen en los residuos; generando un gas resultante principalmente formado por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en proporción: **CH<sub>4</sub> : CO<sub>2</sub> = 71%: 20%**.

#### 1.4.2.8 Métodos para cuantificar y analizar biogás.

- ***Método estequiométrico a partir de la relación ácido acético: ácido propiónico.***

En la metanogénesis la relación ácido acético: ácido propiónico se puede predecir la producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Si esta relación llega a 0,5 la pérdida energética puede ser de 0%. Pero si todos los carbohidratos fuesen fermentados a ácido acético y no se produjera ácido propiónico, las pérdidas energéticas podrían llegar a ser del 33%; mientras que la relación acético: propiónico puede variar entre 0,9 y 4, por lo tanto las pérdidas por metano varían ampliamente. (Johnson y Johnson, 1995; Wolin, 1960) citados por (Ramírez, 2010).

- ***Método estequiométrico a partir de la producción de ácidos grasos volátiles.***

Ramírez (2010), menciona como Wolin (1960) ha determinado estequiométricamente la estimación de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> con relación a la producción de AGV, en donde se estima que:



Para calcular la producción de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (Y y Z) para ello se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$Y = \frac{Ma}{2} + \frac{Mp}{4} + \frac{3Mb}{2}$$

#### **Ecuación 1.4**

Donde:

Y: moles de CO<sub>2</sub>.

Ma: proporción molar del ácido acético.

Mp: producción molar del ácido propiónico.

Mb: proporción molar del ácido butírico.

Para el cálculo de CH<sub>4</sub>, se propone la siguiente ecuación:

$$Z = Ma + 2 Mb - Y$$

### **Ecuación 1.5**

En esta metodología se asume que todo el exceso de H<sub>2</sub> es convertido en CH<sub>4</sub> y no hay hidrógeno asociado con la síntesis de células microbiales y que de la fermentación de los sustratos no carbohidratados no se producen AGV. Cuando se toman en cuenta a las células microbiales son incluidas en la estequiometría de la fermentación, los estimativos de la producción de metano pueden disminuir (Ramírez, 2010).

- ***Cromatografía de gases.***

En cromatografía de gases (GC), la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna de cromatografía. La elución se produce por el flujo de una fase móvil de un gas inerte, y a diferencia de la mayoría de los tipos de cromatografía, la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito; su única función es la de transportar el analito a través de la columna. Existen dos tipos de cromatografía de gases: la *cromatografía gas – sólido* (GSC) y la *cromatografía gas-líquido* (GLC). La cromatografía gas – líquido tiene gran aplicación en todos los campos de la ciencia y su denominación se abrevia normalmente como *cromatografía de gases* (GC) (Cromatografía de gases, 2010).

- ***Medición in situ.***

Consiste en un equipo portátil que lo opera personal entrenado un ejemplo de ello es el equipo TESTO que se compone de una sonda de muestreo de 335 mm de longitud y un Tubo Pitot de 350 mm de longitud que nos permiten medir: Oxígeno, Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno, Dióxido de Azufre, Temperatura Absoluta, Presión diferencial, Velocidad, Caudales, Rendimiento y Exceso de aire.

Además permite realizar monitoreos o controles de aire en procesos de combustión para la industria y puntos fijos determinando los niveles de emisión de gases de combustión de hornos, calderas, incineradores, entre otros y pudiendo contar con los resultados *in situ*.

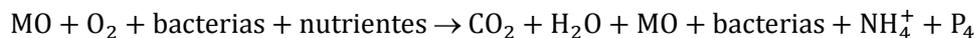
#### 1.4.2.9 Procesos de biodigestión.

Es un proceso biológico de fermentación natural, en el cual la población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bio-procesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011).

- *Digestión aerobia.*

Consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos, que precisan de oxígeno atmosférico o disuelto en el agua. La materia orgánica es fermentada a partir de un aporte energético, dando lugar a una reacción exotérmica (Mendoza & López, 2009).

La fórmula general del proceso de biodigestión aerobia es la siguiente:



En las primeras fases del proceso, cuando su población se pone en contacto con una fuente ilimitada de sustrato, se reproducen con una tasa de crecimiento poblacional logarítmico que sólo está limitada por su propia habilidad de reproducirse; la tasa de consumo de oxígeno aumenta rápidamente debido a la absorción y asimilación de materia orgánica para la síntesis de nueva masa protoplasmática. A medida que progresa la oxidación de la materia orgánica disponible, la tasa de crecimiento bacteriano empieza a disminuir. Las fuentes de carbono orgánico disponibles se hacen limitantes, y por consiguiente, también se presenta una disminución en la tasa de consumo de oxígeno. Cuando la cantidad de materia orgánica disponible es apenas suficiente para garantizar la subsistencia de las distintas especies de microorganismos, éstos comienzan a auto-oxidarse mediante su metabolismo endógeno (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011).

*La digestión aeróbica presenta las siguientes ventajas:*

- Facilidad de operación del sistema.
- Bajo capital de inversión.
- No genera olores molestos.
- Reduce la cantidad de coliformes fecales y demás organismos patógenos.
- Produce un sobrenadante con un baja DBO<sub>5</sub> con pocos sólidos y poco fósforo.

*Desventajas del sistema aeróbico:*

- Altos costos de operación causados por los altos contenidos de energía.
- Existe falta de criterios y parámetros claros para el diseño de equipos.
- Dificultad que presentan los lodos digeridos aeróbicamente para ser separados mediante centrifugación y filtración al vacío.

Uno de los procesos aerobios para tratar los residuos sólidos orgánicos es el compostaje, puede desarrollarse a nivel doméstico como a nivel industrial en grandes plantas de compostaje (Mendoza & López, 2009).

- ***Digestión anaerobia.***

Es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato que pueden ser residuos animales y vegetales, son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores; a continuación se detalla más acerca de este proceso (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011).

#### **1.4.2.10 Proceso de digestión anaerobia.**

Bermudez, Canovas, Manjon, Iborra, y Howel (1988) mencionan que la digestión anaerobia es un proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno.

La fermentación es uno de los mecanismos de degradación de la biomasa más frecuente en la naturaleza, y en la actualidad conocido como el proceso unitario de

tratamiento de digestión anaerobia, es empleado como bien lo menciona Pérez (2010), para la depuración de aguas residuales, fangos procedentes de la industria química, alimentaria, papelera, residuos vegetales, estiércol entre otros.

En este proceso las moléculas orgánicas complejas son descompuestas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea por medio de microorganismos. Debido a que el proceso sucede en condiciones rigurosas de ausencia de oxígeno y se prolonga el tiempo necesario, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en una mezcla de productos gaseosos principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), conocido como biogás; consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano y dando lugar a una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos o fangos), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), el fósforo (P) y la totalidad de los elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa (De La Torre, 2008) (Pérez, 2010).

*Ventajas de la digestión anaerobia:*

- No requiere Oxígeno.
- Produce de 3-20 veces menos lodos que los tratamientos aerobios (20-150 vs. 400-600 kg biomasa/m<sup>3</sup> DQO).
- Produce biogás, con suficientes contenidos de metano.
- El subproducto lodos es utilizable como abono o fertilizante.
- Eficiente a elevadas cargas de DBO.
- Preservación de la actividad aun cuando el sistema no ha operado por largos periodos de tiempo.
- Evita los malos olores entre el 90 y 100%.

Además según De La Torre (2008), la digestión anaerobia presenta una ventaja extra, pues existen pruebas que han demostrado que los sistemas de biogás pueden matar:

- 90% - 100% de huevos de anquilostomiasis.
- 35% - 90% de áscaris (lombrices intestinales).
- 90% - 100% de fasciolas sanguínea (esquistomas fasciolas que se encuentran en el agua y en los caracoles que viven en los arrozales y estanques).

Además estudios de “*producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo*” y “*efecto del biodigestor plástico en flujo continuo en el tratamiento de aguas residuales de establos bovinos*”, señalan que las unidades formadoras de colonias (UFC) en el primer caso, pasan de  $9 \times 10^{11}$  UFC  $\text{ml}^{-1}$  de muestra, quedando en cero y en el segundo caso pasaron de  $7 \times 10^9$  UFC  $\text{ml}^{-1}$  de muestra, los cuales de igual manera quedaron en cero, posterior a un proceso de digestión anaerobia (Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008).

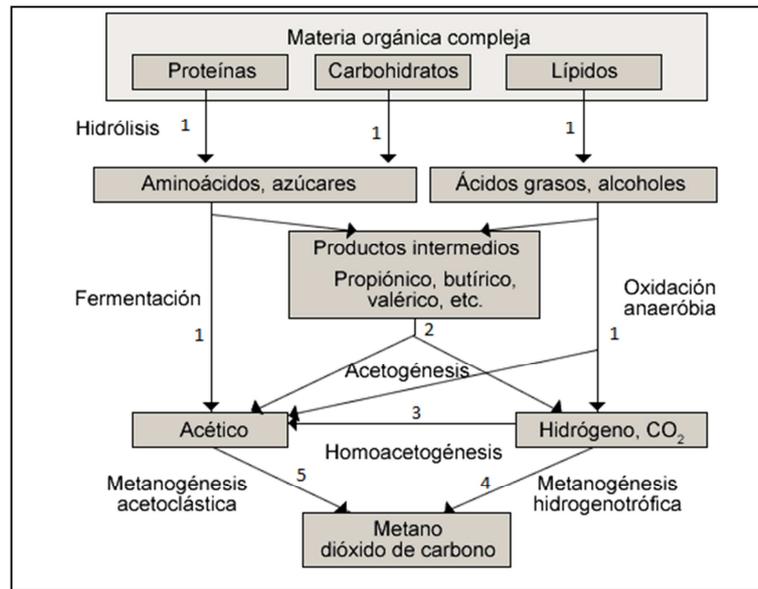
*Desventajas de la digestión anaerobia:*

- Más lento que el tratamiento aerobio, es decir la digestión anaerobia requiere mayores tiempos de contacto es decir, mayor tiempo de retención hidráulica.
- Más sensible a los choques tóxicos.
- Sensible a factores como temperatura, pH, velocidad de carga, etc.
- El proceso de digestión anaerobia no genera calor.
- Facilidad de agregar agua para hacer la mezcla con el estiércol que será introducida en el digestor.
- Disponibilidad de sustrato.

#### **1.4.2.11 Proceso microbiológico y bioquímico de las etapas de la digestión anaerobia.**

La digestión anaerobia es un proceso complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. Muchas de éstas reacciones ocurren de forma simultánea como se puede observar en la Figura 1.2 (Martí N., 2006).

De acuerdo a De La Torre (2008) y Martí N. (2006), tanto los estudios bioquímicos y microbiológicos, dividen al proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica en cuatro fases o procesos: Hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica.



**Figura 1.2. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos.<sup>2</sup>**

Fuente: (Pavlosthatis y Giraldo-Gómez) citados en (Martí N., 2006).

- **Hidrólisis**

La hidrólisis de la materia orgánica polimérica a compuestos solubles o monómeros es el paso inicial para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos, ya que los microorganismos únicamente pueden utilizar materia orgánica soluble que pueda atravesar su pared celular. Por tanto, es éste proceso el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaerobia. La acción de las enzimas extracelulares producida por los microorganismos hidrolíticos, la que lleva a cabo la hidrólisis de moléculas complejas (Martí N., 2006).

Como lo citan Martí N. (2006) y De La Torre (2008) a Pavlosthatis & Giraldo Gómez (1991), la etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso

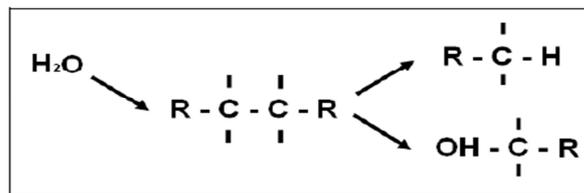
---

<sup>2</sup> Los números indican la población bacteriana responsable de cada proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

global, sobre todo tratándose de residuos con alto contenido de sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso.

La celulosa, proteínas y grasas son fragmentados en monómeros tal como se observa en la Figura 1.3, por hidrolasas, estas enzimas provienen exclusivamente de bacterias de metabolismo anaeróbico y actúan sobre los polímeros orgánicos u otros materiales complejos despolimerizándolos enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos (Pérez, 2010).

Posteriormente estos compuestos experimentan un proceso de fermentación que origina diferentes ácidos orgánicos. Esta etapa resulta indispensable para lograr la ruptura de los biopolímeros complejos en polímeros solubles o monómeros, puesto que los microorganismos que realizan la depuración solamente son capaces de actuar sobre materia orgánica disuelta (Pérez, 2010).



**Figura 1.3. Formación de los monómeros en la hidrólisis.**

Fuente: (Pérez, 2010).

De La Torre (2008) y Pérez (2010), coinciden en que no todas las partículas del sustrato tienen la misma facilidad para degradarse, existen factores que afectan la hidrólisis y entre ellos:

- El pH (solubilización de las partículas) y las variaciones de temperatura.
- Tamaño de las partículas, las partículas grandes son más lentas en la degradación que las partículas pequeñas.
- Tipo de materia a degradarse, los almidones, proteínas y la celulosa se degradan a diferentes ritmos para un rango de 15-35°C.

- La presencia de algún compuesto tóxico o inhibidor de la población bacteriana son responsables de la producción de enzimas extracelulares. Por ejemplo, la concentración de amonio influye negativamente en la generación de peptonas; la concentración total de ácidos grasos volátiles limitan la tasas de hidrólisis de carbohidratos y proteínas; además, Henze *et al.* (1995) citado por (De La Torre, 2008) considera que la tasa de hidrólisis está inhibida por la concentración de oxígeno y nitrógeno.

Como bien lo menciona Martí N. (2006), cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

*Hidratos de Carbono.* La hidrólisis de carbohidratos toma lugar en algunas horas, por lo que no constituyen una limitante para el proceso, constituyen una fuente de carbono pero cuyos valores no son tan altos como los de las proteínas (Pérez, 2010).

*Proteínas.* La hidrólisis de las proteínas es un proceso que toma algunos días, pero constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia ya que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de dicho proceso, tienen un elevado valor nutricional (Pérez, 2010). Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso (Martí N., 2006).

*Lípidos.* En ambientes anaerobios comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol (Martí N., 2006).

*Materiales lignocelulósicos.* Compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta e incompleto que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis y por tanto de la degradación anaerobia de determinados sustratos. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaerobios, afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y

de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos (Martí N., 2006).

Según O'Rourke (1968) citado por De La Torre (2008), el tiempo que toma la degradación entre los lípidos, celulosa y proteínas son diferentes. Como se puede observar en la Tabla 1.9, que presenta los resultados de estudios hechos en digestores o reactores continuos, alimentados con desperdicios domésticos el cual demuestra que la celulosa es la que más tiempo toma en degradarse y la que mayor temperatura necesita así en 15 °C no muestra degradación en los primeros 5 días, mientras que a 35°C en 60 días se observa que tuvo una degradación pero aun queda 0,21% restante; en contraste las proteínas a los 5 días tampoco muestra degradación, pero a los 60 días a una temperatura muestra una degradación casi total quedando un 0,001% restante.

**Tabla 1.9. Variación del tiempo de retención en función de la temperatura en diversos componentes de la biomasa.**

Componente	Temperatura °C	Tiempo de retención de sólidos (Días)				
		5	10	15	30	60
Lípidos	35	0,01	0,17	0,11	0,06	0,04
	20	0	0	0,02	0,05	0,03
	15	-	0	0	0	0
Celulosa	35	1,95	1,21	0,62	0,38	0,21
	20	0,09	0,14	0,13	0,14	0,10
	15	-	0,05	0,03	0,10	0,08
Proteínas	35	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01
	20	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01
	15	-	0,03	0,02	0,01	0,01

Fuente: (De La Torre, 2008).

La sostenibilidad de esta etapa se basa en la presencia de microorganismos anaeróbicos facultativos que son consumidores del oxígeno disuelto en el agua y por tal

baja el potencial redox, lo que es la base para la proliferación de más microorganismos anaeróbicos (Pérez, 2010).

Como menciona Pérez (2010), en esta etapa encontramos bacterias anaerobias facultativas como las enterobacterias, bacterias aerotolerantes como las bacterias del ácido láctico y bacterias anaerobias estrictas como: *Clostridium*, *Propionibacterium*, *Selenomona*.

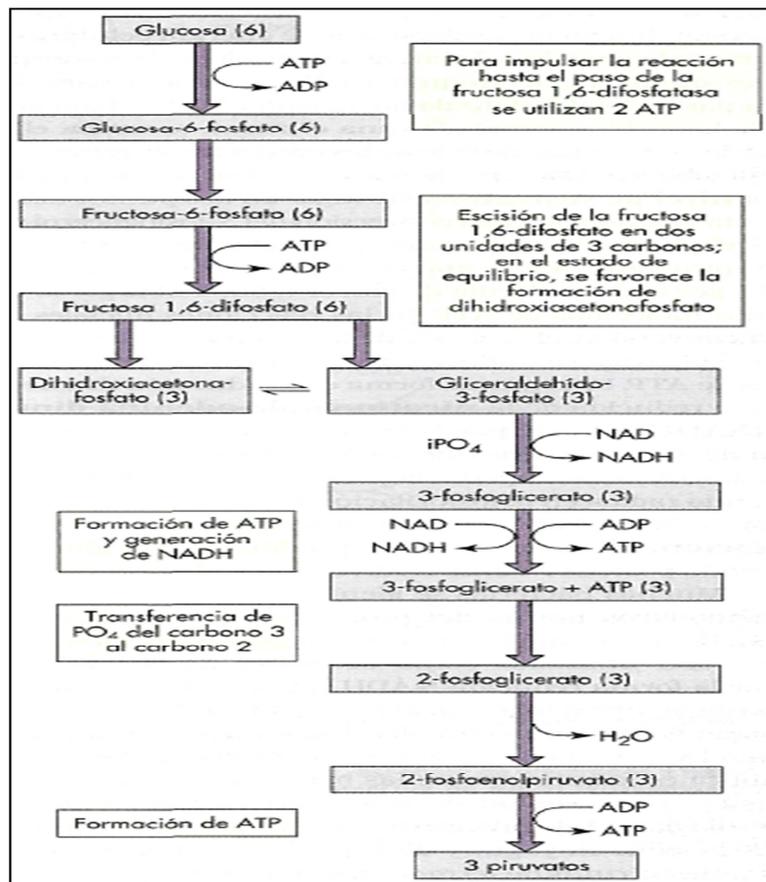
- ***Etapas fermentativa o acidogénica.***

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (ácido acético, ácido fórmico e Hidrógeno), y compuestos orgánicos más reducidos (ácido propiónico, ácido butírico, ácido valérico, ácido láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso (Martí N., 2006).

*Fermentación de carbohidratos solubles.* La principal ruta metabólica de degradación de glucosa para formar ácidos orgánicos es la de Embden-Meyerhof (Figura 1.4) que tiene como principal intermediario el piruvato. La fermentación de azúcares se realiza por diversos tipos de microorganismos. En función de cada organismo, la ruta metabólica y los productos finales son diferentes (Martí N., 2006).

Los principales microorganismos asociados a la degradación de la glucosa son del género *Clostridium* y convierten la glucosa en ácido butírico, ácido acético, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. La glucosa se convierte en piruvato mediante la ruta Embden-Meyerhof, y el piruvato se desdobla a Acetil-CoA y CO<sub>2</sub>. El Acetil-CoA se reduce en los productos de fermentación empleando como transportador de electrones el NADH derivado de las reacciones glucolíticas de la ruta Embden-Meyerhof (Martí N., 2006).

A continuación Figura 1.4...



**Figura 1.4. La rutas glucolíticas de Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) provoca la conversión de glucosa en piruvato<sup>3</sup>.**

Fuente: (Leningher, 1992).

*Fermentación de aminoácidos.* Según Martí N. (2006) los principales productos de la fermentación de aminoácidos y de otras moléculas hidrogenadas son ácidos grasos de cadena corta, ácido succínico, ácido aminovalérico e H<sub>2</sub>. La fermentación de aminoácidos se considera un proceso rápido y que, en general, no limita la velocidad de degradación de compuestos proteicos.

<sup>3</sup> La suma de glucosa+ 2 ADP + 2 Pi + 2 NAD → 2 piruvatos + 4 ATP + 2 NADH + 2 H<sup>+</sup>. Las dobles flechas indican la reacción de 2 moles por cada mol de glucosa. ADP, difosfato de adenosina; ATP, trifosfato de adenosina; iPO<sub>4</sub>, fosfato inorgánico; NAD, nicotinamida-adenina dinucleótido; NADH, forma reducida de nicotinamida-adenina dinucleótido.

Además Martí N. (2006) menciona que las bacterias proteolíticas que mayoritariamente se han identificado, pertenecen al género *Clostridium*, aunque otras especies tales como *Peptococcus* y *Bacteroides* también están presentes.

Los productos finales de la oxidación son  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  y un ácido carboxílico con un átomo de carbono menos que el aminoácido oxidado (n-butírico y ácido isobutírico, ácido isovalérico, sulfuro de hidrógeno, metilcaptano, cadaverina, putrescina, etc. Según el aminoácido del que proceda (Martí N. , 2006).

*Ácidos grasos de cadena larga.* Son oxidados a ácidos grasos de cadena corta por el mecanismo de  $\beta$ -oxidación. Los ácidos grasos libres son introducidos en la célula a través de la pared celular y una vez en su interior, son transformados en el correspondiente tio-éster-CoA. La  $\beta$ -oxidación es un ciclo en espiral que va liberando un acetil-CoA en cada bucle, produciendo, principalmente ácido acético (Martí N. , 2006).

En condiciones anaerobias, este mecanismo es termodinámicamente desfavorable y muy dependiente de la presión parcial del hidrógeno, por lo que es de gran importancia la acción simbiótica de los microorganismos consumidores de hidrógeno para que se pueda producir (Martí N., 2006).

En resumen las acciones que se dan en esta etapa de fermentación son:

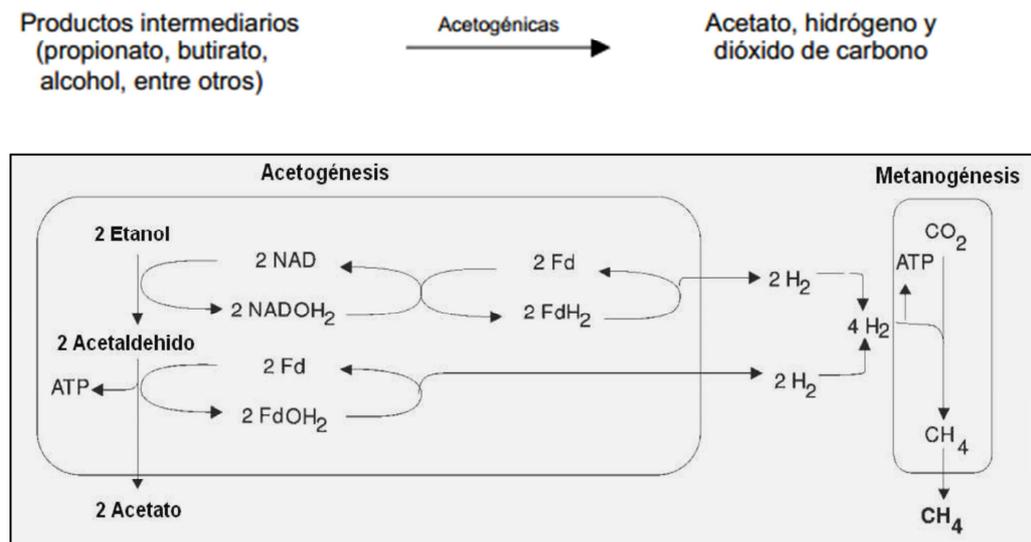
- Fermentación de carbohidratos solubles.
- Fermentación de aminoácidos.
- Fermentación de hidratos de carbono + aminoácidos.

#### **Factores que afectan en esta etapa.**

La concentración de Hidrógeno y la influencia del pH son los principales inhibidores de la oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga (AGCL) (De La Torre, 2008).

- **Etapa acetogénica.**

Los productos de la fase acidogénica sirven de sustrato para la formación de otras bacterias, tal como lo muestra un esquema de la degradación acetogénica y la simbiosis con los organismos metanogénicos como se indica en la Figura 1.5 (Pérez, 2010).



**Figura 1.5. Esquema general de la degradación acetogénica.**

Fuente: (Canul, 2010) (Pérez, 2010).

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H<sub>2</sub> y ácido acético), otros como el etanol, ácidos grasos volátiles como valerato, butirato, propionato, etc. y algunos compuestos aromáticos, deben ser transformados en productos más sencillos como acetato e Hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas (De La Torre, 2008).

Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini* (De La Torre, 2008) (Martí N., 2006).

Desde el punto de vista termodinámico, estas reacciones no son posibles porque en condiciones estándar (pH=7, T=25°C, P=1 atm), presentan energías libres de reacción positivas, tal y como se muestra en la Tabla 1.10.

**Tabla 1.10. Reacciones acetogénicas que ocurren en los sistemas anaerobios.**

<b>Reacciones Acetogénicas</b>	<b><math>\Delta G^\circ</math> (KJ)</b>
<b>Etanol y láctico</b>	
Etanol + H <sub>2</sub> O → Acetato + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+9,6
Lactato <sup>-1</sup> + 2 H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+4,2
<b>Acidos Grasos</b>	
Acetato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+104,6
Propionato <sup>-1</sup> + 3H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + 3H <sub>2</sub>	+76,1
Butirato <sup>-1</sup> + 2H <sub>2</sub> O → 2 Acetato <sup>-1</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+48,1
Valerato <sup>-1</sup> + 3H <sub>2</sub> O → 3 Acetato <sup>-1</sup> + 2H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub>	+96,2
<b>Aminoácidos</b>	
Alanina + 3H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+7,5
Aspartato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	-14,0
Leucina + 3H <sub>2</sub> O → Isovalerato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	+4,2
Glutamato <sup>-1</sup> + 4H <sub>2</sub> O → Propionato <sup>-1</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub>	-5,8
Glutamato <sup>-1</sup> + 7H <sub>2</sub> O → Acetato <sup>-1</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 3H <sup>+</sup> + 5H <sub>2</sub>	+70,3

Fuente: (Martí N. , 2006).

Sin embargo, a presiones parciales de H<sub>2</sub> bajas (del orden de 10<sup>-4</sup>-10<sup>-5</sup> atm), estas reacciones pasan a ser termodinámicamente favorables y la variación de energía libre es suficiente para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano. Por lo tanto, el principal inhibidor de la acetogénesis, cuya acumulación provoca la rápida acumulación de sustratos, es la acumulación de hidrógeno molecular (Martí N., 2006).

Martí N. (2006) nombra un tipo especial de microorganismos acetogénicos, llamados homoacetogénicos; capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como la mezcla H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato.

Según Martí N. (2006), menciona que el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno, permitiendo así la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Como se verá en la siguiente etapa, las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas también consumen  $H_2$  ayudando así al mantenimiento de presiones parciales bajas de  $H_2$ .

Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum* (De La Torre, 2008).

- ***Etapas metanogénicas.***

Corresponde a la cuarta etapa de la descomposición anaerobia y comprende la formación de metano en condiciones estrictamente anaeróbicas, esta degradación es estrictamente energética y no cualquier microorganismo metanogénico puede degradar cualquier sustrato, así se pueden distinguir los siguientes grupos:

- Sustratos tipo  $CO_2$ :  $CO_2$  (con electrones derivados de  $H_2$ , algunos alcoholes o piruvato),  $HCOO^-$ ,  $CO$ .
- Sustratos de metilo:  $CH_3OH$ ,  $CH_3NH_3^+$ ,  $(CH_3)_2NH_2^+$ ,  $(CH_3)_3NH^+$ ,  $CH_3SH$ ,  $(CH_3)_2S$ .
- Sustratos acetotróficos:  $CH_3COO^-$ .

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos mono carbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , formiato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea* y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas. Así por ejemplo todos ellos poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación del metano. (Martí N., 2006). Las principales reacciones metanogénicas se recogen en la Tabla 1.11.

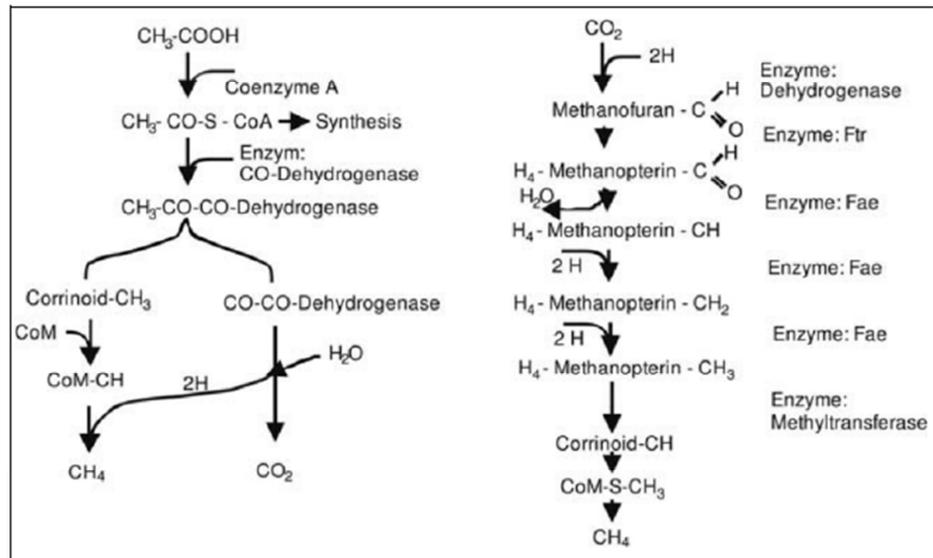
**Tabla 1.11. Principales reacciones metanogénicas.**

<b>Reacciones hidrogenotróficas</b>	<b><math>\Delta G^\circ</math> (KJ)</b>
$4H_2 + H^+ + 2HCO_3^- \rightarrow \text{Acetato} + 4 H_2O$	-104,6
$4H_2 + 4S^\circ \rightarrow 4HS^- + 4H^+$	-112
$4H_2 + 2HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135,6
$H_2 + 4SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$	-151,9
$4H_2 + 4 \text{ fumarato} \rightarrow 4 \text{ succinato}$	-344,6
$4H_2 + NO_3^- + 2H^+ \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$	-599,6
<b>Interconversión formato-hidrógeno</b>	
$H_2 + HCO_3^- \rightarrow \text{formato} + H_2O$	-1,3
<b>Metanogénesis acetoclástica</b>	
$\text{Acetato} + H_2O \rightarrow HCO_3^- + CH_4$	-31,0
<b>Metanogénesis a partir de otros sustratos</b>	
<i>Fórmico</i> $4HCOOH \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O$	-----
<i>Metanol</i> $4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$	-----
<i>Trimetil-amina</i> $4(CH_3)_3N + 6H_2O \rightarrow 9CH_4 + 3CO_2 + 4NH_3$	-----
<i>Dimetil-amina</i> $2(CH_3)_2NH + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2NH_3$	-----
<i>Monometil-amina</i> $4(CH_3)NH_2 + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 4NH_3$	-----

Fuente: (Martí N., 2006).

Cuando la metanogénesis funciona, la etapa acetogénica también funciona sin problemas, en el caso contrario comienza una sobre-acidificación (Pérez, 2010).

Martí N. (2006), menciona que un 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir del acetato, como se observa en la Figura 1.6; a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el  $H_2$  como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotherix*.



**Figura 1.6. Formación de metano a partir de acetato, esto para el mecanismo generado por las coenzimas A y M.**

Fuente: (Pérez, 2010).

De La Torre (2008), claramente expone que la acción de las bacterias productoras de metano en esta fase, es el factor determinante para el desarrollo de la fermentación anaerobia, debido a que estos microorganismos son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura y de acidez, además varían de acuerdo a la toxicidad de ciertos materiales presentes en el medio ocasionando la reducción inclusive la paralización de la digestión.

Finalmente se muestra a continuación en la Tabla 1.12 un resumen las características de las fases hidrólisis, acidogénica, acetogénica y metanogénica (De La Torre, 2008).

A continuación Tabla 1.12...

**Tabla 1.12. Características de las fases microbiológicas de la biomasa.**

<b>Característica</b>	<b>Fase de Hidrólisis</b>	<b>Fase Acidogénica</b>	<b>Fase Acetogénica</b>	<b>Fase Metanogénica</b>
Tipo de Bacteria	Bacterias hidrolíticas.	Bacterias facultativas.	Bacterias facultativas.	Bacterias anaeróbicas estrictas.
Velocidad de Reproducción	Depende del contenido del sustrato.	Reproducción muy rápida.		Reproducción lenta.
Elementos inhibidores	pH, tamaño de partículas, metales pesados dentro del sustrato.	Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura.	Sensibles a la concentración del hidrógeno, la acidez y AGCL.	Muy sensibles a cambios de acidez y temperatura.
Productos	Aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, alcoholes.	Propionato, butirato, acetato, dióxido de carbono e hidrógeno.	Principal producto acetatos.	Principales productos finales metano y CO <sub>2</sub> .

Fuente: (De La Torre, 2008).

#### **1.4.2.12 Digestor.**

Un digestor es una cámara hermética e impermeable en la que se depositan desechos orgánicos (estiércol o material vegetal) para producir en su interior una degradación anaeróbica de la cual se obtiene biogás y fertilizante líquido (Domínguez *et al.*, 2010) o líquido espeso que sirve como bioabono para el cultivo (Bravo & Cosquillo, 2011).

#### **1.4.2.13 Tipos de digestores.**

En la actualidad, existe gran variedad de sistemas de digestión anaerobia, pero todas cuentan con los siguientes accesorios (Acosta, 2011).

- Tubería de entrada de materia orgánica.
- Cámara de fermentación (digestor).
- Cámara de depósito de gas.

- Tubería de salida de materia estabilizada.
- Conducto de gas.

Existen diferentes diseños que se usan para la digestión anaerobia y se clasifican de acuerdo a su funcionamiento y frecuencia de carga (De La Torre, 2008).

- ***Digestores de acuerdo a su funcionamiento.***

*Digestor tipo hindú o de domo flotante.* De La Torre (2008), hace referencia a este tipo de digestor e indica que trabaja a presión constante y es fácil su operación, ya que fue ideado para ser manejado por campesinos de la India en los años 50. Existen varios diseños de este tipo de digestor, pero los más conocidos o utilizados son los verticales y enterrados, y la operación es de tipo Batch.

*Digestor tipo Chino o de cúpula fija.* Los digestores tipo chino o de cúpula fija, fueron diseñados como consecuencia de una mejora de los digestores de tipo indio, con fines específicamente sanitarios y alimenticios (De La Torre, 2008).

El digestor unifamiliar de tipo chino opera básicamente con presión variable debido a su estructura que es estática. Su objetivo no fue producir gas, sino el abono orgánico procesado y recuperado. Estos digestores se cargan en forma semi-continua, se requiere que la primera carga contenga material celulósico, estiércol e inoculantes, hasta un 70% de la capacidad luego se sigue cargando como un digestor continuo. Posteriormente, a los 120 a 180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo. Generalmente se maneja estos digestores en forma continua (De La Torre, 2008).

*Digestor tipo bolsa completa/ biodigestores de polietileno tubular.* De La Torre (2008) menciona que el limitante económico motivó a ingenieros Taiwaneses a investigar para realizar digestores hechos con materiales flexibles (FAO, 1992), que suponen un costo menor. Inicialmente se utilizó el nylon y neopreno, pero los resultados fueron negativos puesto que resultaron ser muy costosos. A través de los años los materiales se han desarrollado y hoy en día las comunidades que usan este tipo de digestor lo hacen con polietileno.

La bolsa representa la cámara de digestión donde la biomasa se fermenta y se va inflando con una presión baja a medida que se produce el biogás, y cuenta con otra bolsa en la parte superior para el almacenamiento del biogás producido, que será llevado por las tuberías a los objetos de uso final como cocinas, lámparas, motores, etc. Se tiene un dispositivo para la entrada de la biomasa y otra para la salida de los fertilizantes (De La Torre, 2008).

- ***Digestores de acuerdo a la frecuencia de carga.***

*Digestores tipo Batch/Lote.* De La Torre (2008) señala que este tipo de digestores está caracterizado por cargarse una vez de forma total y luego descargarse cuando concluye el proceso de digestión. Tiene un orificio de alimentación que es tapado mientras se digiere; pero luego de la descarga (que se da en otro orificio) se vuelve a destapar para recibir la siguiente carga. La materia abastecida será la que se digiera y produzca el biogás, por lo mismo, no hay recambio de carga que permita sostener los niveles de biogás producido; para ello después de su respectivo tiempo de retención hidráulica ( $TRH/t\theta$ ) se descarga y se vuelve a alimentar.

En este tipo de digestores no hay forma de generar más biogás del que ya se generó; es recomendable cuando la materia a procesar está a disposición de manera intermitente; además sirve para la digestión de materiales celulósicos o con contenidos de lignina que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo; trabaja con alimentaciones de altos contenidos sólidos, reduciendo así la necesidad de utilizar agua para mezclar la biomasa (De La Torre, 2008).

*Digestores de tipo continuo.* Consiste en, una vez alimentado con la primera carga, se debe mantener la alimentación regularmente. La biomasa a utilizar tiene que estar mezclada con agua, esta mezcla debe producirse fuera del digestor, antes de la alimentación (De La Torre, 2008).

Una vez que el proceso de digestión se ha estabilizado, la tasa de producción es bastante constante siempre que se mantenga la velocidad de alimentación así como la temperatura (De La Torre, 2008).

*Digestores de tipo semi continuo.* Es una combinación del tipo de digestor discontinuo o tipo lote con el continuo. En este tipo de digestor, el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida. Como consecuencia el volumen del sustrato que se alimenta el digestor permanece constante. La carga generalmente es en forma diaria, pero la descarga total a diferencia del tipo lote sólo será una o dos veces al año. Para poder aprovechar el poder fertilizante de los residuos de la digestión y de los lodos estos se vuelven a utilizar como alimentación del digestor (De La Torre, 2008).

Este tipo de digestor es el más difundido a nivel mundial y dentro de ellas existen pequeñas variaciones, pero todas parten del mismo principio. Por ello, es el tipo más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños o para uso doméstico. Los diseños más representativos son el hindú y tipo chino (De La Torre, 2008).

#### **1.4.2.14 Factores que determinan la producción de gas.**

Tal como lo expone Pérez (2010), en su tesis “*ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA APLICACION EN PEQUEÑOS GANADEROS Y LECHEROS*”, con todos los procesos biológicos involucrados, la constancia de las condiciones de vida es importante, un cambio en la temperatura, cambios en el sustrato o en la concentración de éste puede llevar a una cancelación del mecanismo de producción de biogás; es así que resume los parámetros a tomar en cuenta en la Tabla 1.13, y a continuación se detallará cada uno de ellos.

A continuación Tabla 1.13...

**Tabla 1.13. Parámetros presentes en las etapas principales de degradación.**

Parámetro	Unidades	Hidrólisis/Acidogénesis	Formación de metano
Temperatura	°C	25-35	Mesofílico (32-42) Termofílico ( 50-58)
Valor de pH	----	5,2-6,3	(6,7-7,5)
Relación C/N	-----	(10-45)	(20-30)
Contenido de MS	%	<40	<30
Potencial Redox	mV	(-400 a -300)	<-250
Relación C/N/P/S requerida	----	500/15/5/3	600/15/5/3
Trazas de elementos	----	n/a	Ni,Co,Mo,Se

Fuente: (Pérez, 2010).

- **Temperatura.**

Según Hilbert (2003), para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4° a 5°C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70°C.

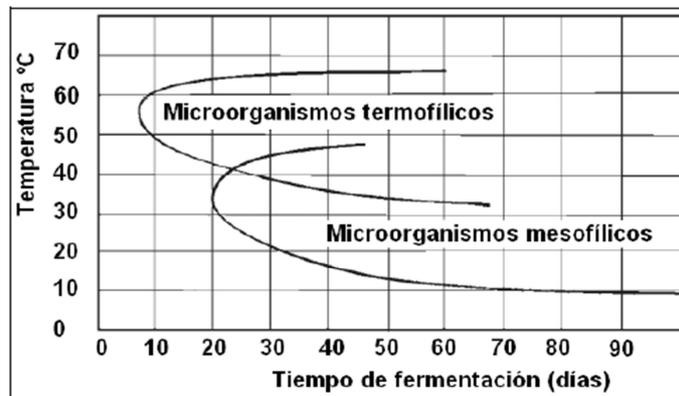
La temperatura en que se realiza el proceso de digestión anaeróbica varía entre los 15 y 60°C. Los microorganismos metanogénicas son muy sensibles a los cambios de temperatura, un cambio brusco sobre 3°C puede afectar gravemente la producción de biogás. (Bravo & Cosquillo, 2011). Para el desarrollo óptimo del proceso se distinguen tres rangos: Psicrófilo, Mesófilo, Termófilo.

*Psicrófilo.* Se desarrolla bajo los 20°C, la producción de biogás en este rango es baja, siendo casi cero al llegar a los 10°C (Bravo & Cosquillo, 2011).

*Mesófilo.* Se desarrolla entre los 25 y 40°C, las bacterias desarrolladas en este rango, son de rápida reproducción y la mayoría de los desechos orgánicos se pueden digerir en este rango para la producción de biogás. La temperatura óptima para este rango es de 35°C (Bravo & Cosquillo, 2011).

*Termófilo.* Se desarrolla entre los 50 y 60°C, este es el rango de mayor producción de biogás y en el menor tiempo, pero debido a la alta sensibilidad de las bacterias termofílicas, este rango es usado solo en instalaciones a nivel industrial (Bravo & Cosquillo, 2011).

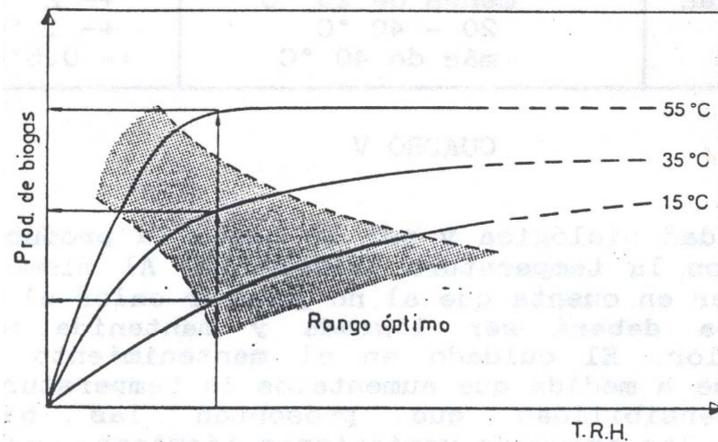
Se deberá tomar en cuenta como lo dice Hilbert (2003), que la actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura (Figura 1.7), al mismo tiempo se deberá tener presente, que al no generar calor la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior.



**Figura 1.7. Rangos de operación para organismos mesófilos o termófilos.**

Fuente: (Pérez, 2010).

Según Hilbert (2003), Botero y Preston (1987), Domínguez *et al.* (2010), Pérez, (2010), Bravo y Cosquillo (2011); la temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación. A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de digestor para digerir una misma cantidad de biomasa, y si, la temperatura es menor, se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias, que tengan menor actividad, sean capaces de digerir el lodo y de producir biogás (Figura 1.8) (Martí, 2008).



**Figura 1.8. Producción de gas en función del TRH.**

Fuente: (Hilbert, 2003).

- **Tiempo de retención.**

Sánchez (2003), define el tiempo de retención como el número de días que demora la masa en producir metano, el cual depende del volumen del digestor y del caudal de materia que ingresa por día. Cada sustrato tiene un óptimo tiempo de retención y éste solo puede ser determinado en la práctica para cada caso. Para estiércol líquido a temperatura mesofílica, el tiempo de retención aproximado, dependiendo del residuo de animal, se muestra en la Tabla 1.14.

**Tabla 1.14. Tabla comparativo Sustrato vs. Tiempo de retención.**

Sustrato	Tiempo de Retención en días
Estiércol vacuno líquido	20-30
Estiércol porcino líquido	15-25
Estiércol animal mezclado con plantas	50-80
La incorporación de residuos del faenamiento de animales puede reducir el tiempo de retención de 10 a 15 días.	

Fuente: (Sánchez, 2003).

Sin embargo Martí (2008), Bravo y Cosquillo (2011), mencionan, que la temperatura es un factor importante a la hora de decidir el tiempo de retención por lo que a

continuación se muestra como la región climática ayuda a definir el tiempo de estadía del sustrato en el digestor (Tabla 1.15).

**Tabla 1.15. Tabla comparativo temperatura vs. Tiempo de retención.**

<b>TIEMPO DE RETENCIÓN SEGÚN LA TEMPERATURA</b>		
<b>Región característica</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo de retención (Días)</b>
Trópico	30	15
Valle	20	25
Altiplano	10	60

Fuente: (Martí, 2008; Bravo & Cosquillo, 2011).

- ***Valores de pH en la fase líquida.***

El proceso de digestión bacteriana produce biogás a valores de pH entre 6,7 y 7,5, un medio prácticamente neutro, el pH se mantiene en ese rango, solo si el biodigestor está operando correctamente (Botero & Preston, 1987). Los ácidos grasos disminuyen la alcalinidad a menos que la alcalinidad bicarbonatada sea suficiente para neutralizar dichos ácidos (Pérez, 2010).

Como bien lo recalca Pérez (2010), los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación. Parece ser que el pH afecta fundamentalmente a la actividad enzimática de los microorganismos mediante: cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como el carboxil y amino; alteración de los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo el sustrato; y desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas. Para que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3. Sin embargo, el proceso de inhibición parece ser completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración.

Según Botero & Preston (1987), las causas por las cuales se puede acidificar la fase líquida contenida dentro del biodigestor son:

- Un cambio excesivo de la carga.
  - El permanecer por largo tiempo sin recibir carga.
  - La presencia de producto tóxico en la carga.
  - Un cambio amplio y repentino de la temperatura interna.
- ***Estiércol disponible.***

Martí (2008); Bravo y Cosquillo (2011), indican que la materia prima para la producción de biogás es el estiércol fresco, también se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros con cascaras duras o de larga duración de descomposición como vísceras.

El estiércol más equilibrado es el de vaca, además que por cada cabeza de ganado se produce gran cantidad de este, y por tanto es de fácil disponibilidad (Martí, 2008).

En el momento de la construcción del digestor la cantidad de estiércol toma el nombre de *Cantidad total de residuo (T)* y es la cantidad de residuo orgánico que produce la fuente en kg por día. Valores promedio de producción de residuo por fuente se muestran en la Tabla 1.16 (Sánchez, 2003).

- ***Relación carbono nitrógeno (C/N) en las excretas.***

Para lograr una máxima producción de biogás, se requiere una proporción adecuada de micro y macronutrientes (Bravo y Cosquillo, 2011). Según Pérez (2010), la razón entre los nutrientes C/N debe estar en el orden 16:1-25:1.

Los carbohidratos y la proteína son los nutrientes indispensables para el crecimiento desarrollo y actividad de las bacterias anaeróbicas. El carbono contenido en el estiércol es el elemento que las bacterias convierten en metano (CH<sub>4</sub>). El nitrógeno es utilizado para la multiplicación bacteriana y como catalizador en el proceso de producción de biogás. Si su nivel es alto el proceso se retarda por el exceso de amoníaco y la alcalinización de la fase líquida, e incluso puede llegar a detenerse (Botero & Preston, 1987).

Por estudios se conoce que el contenido de carbono en el estiércol del bovino es excesivo, como lo es también el contenido de nitrógeno en el estiércol del cerdo. De ahí que se presenta la posibilidad de mezclar las excretas de varias especies animales (Botero & Preston, 1987).

- ***Contenido de sólidos.***

Según Sánchez (2003) el contenido de sólidos también conocido como la *Cantidad total de residuo (T)* es la cantidad de residuo orgánico que produce la fuente en kg por día. Los valores promedio de producción de residuo en este caso estiércol bovino se muestran en la Tabla 1.16 (Sánchez, 2003).

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede afectarse la eficiencia y producción de gas (Hilbert, 2003).

En este punto no existen reglas fijas; mediciones realizadas utilizando mezclas de estiércoles animales en agua han determinado que para digestores continuos el porcentaje de sólidos óptimo oscila entre el 8% y el 12% (Hilbert, 2003).

A partir de los sólidos totales derivan una serie de contenidos parciales, que forman parte del mismo:

*Contenido total de sólidos (ST):* Corresponde a la parte de la materia orgánica seca, sin la humedad. Para determinar el ST de un sustrato se lo debe secar durante 5 horas a 105 °C y luego pesar el residuo sólido que queda. De igual manera valores promedio de TS del estiércol bovino se muestran en la Tabla 1.16. (Sánchez, 2003).

*Contenido de sólidos volátiles (SV):* Es la parte del total de sólidos que se puede transformar en biogás. Este se puede obtener quemando los sólidos orgánicos (ST) hasta que quede solamente la ceniza. La relación de la cantidad de ceniza respecto de la cantidad total son los SV. Los valores promedio de SV de estiércol bovino se muestran en la Tabla 1.16 (Sánchez, 2003).

**Tabla 1.16. Características de la materia orgánica utilizada en biodigestión anaeróbica.**

No.	Fuente	W	T	ST	SV	N	P	K	ST/T	SV/ST
1	Vaca	500	86	12	10	0.45	0.094	0.29	14%	83%
2	Toro	500	58	8.5	7.2	0.34	0.092	0.21	15%	85%
3	Becerro	40	62	5.2	2.3	0.27	0.066	0.28	8%	44%
4	Chanco	10	84	11	8.5	0.52	0.18	0.29	13%	77%
5	Oveja	60	40	11	9.2	0.42	0.87	0.32	28%	84%
6	Chivo	50	41	13		0.45	0.11	0.31	32%	0%
7	Caballo	400	51	15	10	0.3	0.071	0.25	29%	67%
8	Gallina	2.2	85	22	17	0.84	0.3	0.3	26%	77%
9	Roedor	2	64	16	12	1.1	0.3	0.4	25%	75%
10	Pavo	8	47	12	9.1	0.62	0.23	0.24	26%	76%
11	Pato	3	110	31	19	1.5	0.54	0.71	28%	61%

Fuente: (Sánchez, 2003).

**Donde:**

W : Peso promedio del animal en kg.

T : Cantidad total residuo (estiércol) promedio en kg por cada 1000 kg de peso del animal.

ST : Contenido promedio total del sólidos en kg por cada 1000 kg de peso del animal.

SV :Contenido promedio de sólidos volátiles en kg por cada 1000 kg de peso del animal.

N :Contenido promedio de nitrógeno en gramos por kilo de sustancia.

P : Contenido promedio de fósforo gramos por kilo de sustancia.

K :Contenido promedio de potasio en gramos por kilo de sustancia.

ST/T : Porcentaje de ST/T.

SV/ST :Porcentaje de SV/ST.

- **Nutrientes.**

Para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas deben disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales (Hilbert, 2003).

- **Tóxicos/inhibidores.**

Aparte del oxígeno, que inhibe la digestión anaeróbica (Bravo y Cosquillo, 2011), concentraciones elevadas de metales pesados, antibióticos y detergentes, pueden causar la interrupción del proceso fermentativo como se observa en la Tabla 1.17 (Hilbert, 2003).

Una concentración alta de ácidos volátiles, también inhibirá la digestión, así como una elevada concentración de Nitrógeno y Amoniacó destruyen las bacterias metanogénicas (Hilbert, 2003).

**Tabla 1.17. Valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes<sup>4</sup>**

<b>Inhibidores</b>	<b>Concentración inhibidora</b>
SO <sub>4</sub>	5000 ppm
NaCl	40 000 ppm
Nitrato (según contenido de N <sub>2</sub> )	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/L
Cr	200 mg/L
Ni	200-500 mg/L
C/N	25 mg/L
Na	3 500-5 500 mg/L
K	2 500-4 500mg/L
Ca	2 500-4 500mg/L
Mg	1 000-1 500 mg/L

Fuente: (Hilbert, 2003).

- ***Velocidad de carga volumétrica.***

Hilbert (2003), menciona este término como el volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digester (kg de material/día). Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención.

Un factor importante a tener en cuenta en este parámetro es la dilución utilizada, debido a que una misma cantidad de material degradable podrá ser cargado con diferentes volúmenes de agua (Hilbert, 2003).

---

<sup>4</sup> Valores que se deben tomar como referencia, puesto que puede existir adaptabilidad por parte de las bacterias.

- ***Carga de mezcla diaria de entrada.***

Según Martí (2008), se debe cargar todos los días el biodigestor con una cantidad de estiércol mezclada con agua en una proporción 1:4 (una parte es de estiércol y cuatro de agua). Pero en el caso de estiércol de ganado bovino, una mezcla de 1:3 es suficiente como se ha visto en algunos estudios, sin embargo en biodigestores tipo chino la mezcla se realiza 1:1. Una buena dilución de la mezcla asegura que el biodigestor realmente sea de flujo continuo, evitando que se atasque por exceso de materia sólida en su interior (Martí, 2008).

Martí (2008) menciona que el suero de la leche de la vaca también está dando muy buenos resultados en la producción de biogás, por lo que es posible que se pueda sustituir parte del agua por suero de vaca.

#### **1.4.2.15 Bioabono/biol.**

Es el producto del proceso de la digestión anaerobia, puede ser sólido o líquido, no posee mal olor, no atrae a moscas a diferencia del estiércol fresco. Este puede aplicarse en cantidades recomendadas directamente al campo en forma líquida o sólida (McCaskey, 1990), citado por (Soria *et al.*, 2001).

Según Martí (2008), la composición del bioabono en promedio tiene nitrógeno de 2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio entorno al 1% y entorno a un 85% de materia orgánica con un pH de 7,5.

Basado en la experiencia Martí (2008), explica las aplicaciones para el fertilizante generado en el biodigestor, de acuerdo al tiempo del cultivo:

- Inicialmente, cuando el terreno se ara, se puede usar el fertilizante recién salido del biodigestor para regar cada surco.
- El día antes de sembrar, se pueden introducir las semillas o grano en una mezcla de 1 a 1 de fertilizante con agua por un tiempo de 4 o 5 horas.

- Una vez en crecimiento la planta, se puede filtrar el fertilizante y fumigar (uso como fertilizante foliar) las plantas con una mezcla de una parte de fertilizante y 4 de agua. Funciona muy bien fumigar tras una helada, así como cuando ya comienza el fruto a aparecer, pero nunca durante la floración, ya que podría llegar a quemar la planta.

#### **1.4.2.16 Agitación.**

Con la agitación se facilita la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digester, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica (Hilbert, 2003).

Para la selección del sistema, su frecuencia e intensidad, Hilbert (2003), menciona que se debe tomar en cuenta que el proceso fermentativo involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias, donde el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente, y una ruptura de este equilibrio representaría una reducción en la producción de gas.

Según Bravo y Cosquillo (2011), se distinguen 3 tipos básicos de agitación:

- Mecánica: A través de agitadores.
- Hidráulica: A través de bombas se hace recircular la biomasa.
- Burbujeo de Biogás: Se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujas.

#### **1.4.2.17 Estabilización química con cal.**

Para la estabilización de lodos provenientes de digestiones anaerobias, líquidos de fosas sépticas, etc. Se pueden utilizar estabilizantes químicos para darles usos a estos residuos, principalmente como fertilizantes (López A., 2011).

La adición del agente químico cal, tiene la finalidad de elevar el pH sobre el valor de 12, límite sobre el cual los organismos no pueden sostener sus funciones metabólicas. Si

se mantiene este valor evitaremos malos olores, la presencia de vectores y se eliminarán los procesos de degradación (Rivera, 2006) citado por (López A., 2011).

Se puede realizar la estabilización utilizando cal hidratada,  $\text{Ca(OH)}_2$ , como cal viva  $\text{CaO}$ , teniendo esta última una ventaja en cuanto a la reacción exotérmica que produce al ser mezclada con agua, contribuyendo a la eliminación de los patógenos por elevación de temperatura (López A., 2011).

Para la estabilización con cal es importante tomar en cuenta factores como: concentración de sólidos, tiempo de contacto entre la cal y el lodo y la dosis de cal. La estabilización con cal no destruye la materia orgánica por lo que la cantidad de cal, será la necesaria para mantener el valor del pH arriba de 12. Es recomendable un contacto mínimo de 2 horas con la cal (Oropeza, 2006) citado por (López A., 2011).

La estabilización con cal representa bajos costos de inversión, pero puede traer altos costos operativos dependiendo del costo de cal, cabe recalcar que el peso del material puede incrementarse entre un 20 y 40% (López A., 2011).

#### **1.4.2.18 Aislamiento térmico.**

La función primaria de los materiales termoaislantes utilizados es reducir la transmisión de calor a través de las paredes, escotillas y tuberías, con esto se evita la transmisión de frío procedente del aire circundante al interior del digestor, uno de los aislantes más utilizados es la lana de vidrio que proviene principalmente del reciclado de vidrio y arena, que es una materia prima natural y de rápida renovación (Isover, 2012).

Esta materia prima brinda a los productos las cualidades necesarias para la edificación: libre de putrefacción y resistencia al fuego. Dado que la arena y el vidrio son naturalmente incombustibles, no es necesario completar con aditivos para que los productos sean no-inflamables. De esta manera, la lana de vidrio contiene 3 veces menos aditivos orgánicos que la lana de fibra vegetal, además gracias a una unión densa de los materiales con una baja conducción y atrapando una gran cantidad de aire, la lana de vidrio es un excelente aislante térmico. A mayor grosor, mayor será la resistencia térmica. Así se logra

reducir la pérdida de calor en invierno y se obtiene protección contra el calor en verano; suave al tacto, fácil de manejar y de instalar. Debido a que es liviana y elástica, un rollo comprimido de lana de vidrio permite ahorrar no sólo en el manejo sino también en transporte y almacenaje. Es más, el calce perfecto hace que la instalación sea perfecta y evita los puentes térmicos no deseados (Isover, 2012).

#### **1.4.2.19 Aireación dentro de un proceso anaerobio.**

La aireación es importante en un proceso aerobio, ya que el O<sub>2</sub> es necesario como receptor de hidrógenos lo que demanda mayor energía; sin embargo en un tratamiento anaerobio no se precisa de O<sub>2</sub>; por lo que el digester deberá ser hermético con el fin de evitar la entrada de aire, el que interfiere con el proceso de fugas y de biogás producido; controlando siempre este factor con la ayuda de pegas y macillas especiales diseñadas para soportar altas presiones y temperaturas que existen en el mercado o en el caso de que sea un digester de concreto asegurarse de que no existan posibles entradas de aire sellándolas bien (Mendoza y López, 2009).

Como medida preventiva, todas las áreas con operaciones de biogás deben estar bien ventiladas para evitar la acumulación peligrosa de sustancias inflamables y tóxicas en caso de fugas. Si el biogás se mezcla con aire en 1:20 se forma una atmósfera potencialmente explosiva (Gon, 2008).

### **1.5 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE DATOS.**

La estadística descriptiva o deductiva trata del recuento, ordenación y clasificación de los datos obtenidos por las observaciones. Se construyen tablas y se representan gráficos que permiten simplificar la complejidad de los datos que intervienen en la distribución. Asimismo, se calculan los parámetros estadísticos que caracterizan la distribución. No se hace uso del cálculo de probabilidades y únicamente se limita a realizar deducciones directamente a partir de los datos y parámetros obtenidos (Borrego, 2008).

El conjunto de elementos a estudiar se denomina población o universo, cada elemento de la población será un individuo o unidad estadística, mientras que una muestra

es un subconjunto limitado extraído de la población. Una vez fijada la población se definen cuales son las características o cualidades que son de interés, clasificándolas en *cualitativas*, aquellas que no se pueden cuantificar y *cuantitativas*, aquellas que si pueden contar. A su vez las características cuantitativas se dividen en dos tipos, *discretas* aquellas que toman valores aislados y *continuos*, aquellas que pueden tomar cualquier valor comprendido en un determinado rango o intervalo. Una vez obtenida la información referente a las variables de estudio, se organizan y resumen en las llamadas distribuciones de frecuencias que pueden ser *absolutas*, que indican el número de individuos que presentan un determinado valor de la variable, o *relativa* que indican el tanto por uno o por ciento de la población que presenta el determinado carácter (Borrego, 2008).

### 1.5.1 Estimación puntual y por intervalo.

Cuando se quiere realizar un estudio de una población cualquiera de la que se desconoce sus parámetros, se debe tomar una muestra aleatoria de dicha población a través de la cual calcular una aproximación a dichos parámetros desconocidos y que se quiere estimar. Existen dos tipos de estimación puntual y por intervalos.

*Estimación puntual.* Una estimación es puntual cuando se usa un solo valor extraído de la muestra para estimar el parámetro desconocido de la población. Al valor usado se le llama estimador (Borrego, 2008).

*Estimación por intervalo.* En una estimación por intervalo se establece el rango de valores dentro del cual se espera que se encuentre un parámetro poblacional con una alta probabilidad, a esta probabilidad se la denomina *nivel de confianza* del intervalo, se la denota por  $(1-\alpha)$  y la fija el investigador. Para construir un intervalo al  $100(1-\alpha)\%$  de confianza para un parámetro desconocido  $\theta$ , se debe estimar dos números estadísticos L y U, de manera que la probabilidad de que  $\theta$  se encuentre entre ellos sea  $(1-\alpha)$ , quedando de la siguiente manera:  $P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha$

L y U forman el intervalo de confianza buscado (Borrego, 2008).

### 1.5.2 Media Aritmética.

Se aplica solamente a variables estadísticas del tipo cuantitativo, la media aritmética o simplemente media se la representa como  $\bar{x}$ ; que corresponde con la idea de repartir todo lo que hay en partes iguales para todos.

Dados  $n$  valores  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  la media será la suma de los valores:  $x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$  y dividida entre el número  $n$  de valores:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

**Ecuación 1.6**

Fuente: (Borrego, 2008).

Abreviadamente, escrita como:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

**Ecuación 1.7**

Fuente: (Borrego, 2008).

### 1.5.3 Estimación por intervalos de confianza para la media.

Siendo desconocida la media poblacional de una cierta variable que se desea estudiar, se saca una muestra y se trata de obtener un intervalo (L y U) de forma que se tenga una probabilidad alta  $(1-\alpha)$  % de que la media poblacional esté en ese intervalo. El nivel de confianza del intervalo  $(1-\alpha)$ % lo fija el investigador, se suele trabajar con 95% y a veces con 99% o el 90%; es decir, con probabilidad 0,05, 0,01 o 0.1 (García M. , 2003).

*Prueba de Hipótesis.*

En la prueba de hipótesis se pone a prueba una conjetura o hecho sobre la naturaleza de una población a base de la información de una muestra

*Hipótesis Nula ( $H_0$ )*. Es premisa, reclamo, o conjetura que se pronuncia sobre la naturaleza de una o varias poblaciones. Si la información obtenida de la muestra no apoya el reclamo en la hipótesis nula, entonces otra cosa es cierta. La premisa alterna a la hipótesis nula se llama *hipótesis alterna*.

*Hipótesis Alterna  $H_1$* . Una premisa que es cierta cuando la hipótesis nula es falsa.

#### **1.5.4 Criterio de rechazo de hipótesis.**

Hace referencia a la región sobre la cual cae el valor del estadístico de prueba, si es dentro del rango de valores de la región de aceptación o en la región de rechazo para deducir si el supuesto bajo el cual se construyó  $H_0$  es el adecuado (García M., 2003).

## CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.

El proyecto se realizó en las instalaciones de la Finca “Rancho Santa Esther” ubicada en del sector “La Delicia”, parroquia Tulcán, cantón Tulcán, provincia del Carchi.

La entrada al sector La Delicia, se encuentra a 15 minutos de la carretera Panamericana Norte a lado en la bodega aduanera temporal del Obelisco en la entrada a la ciudad de Tulcán (Figura 2.1).



**Figura 2.1. a) entrada principal al sector La Delicia, b) entrada al sector La Delicia y Las Peñas, c) vista de la finca “Rancho Santa Esther”.**

Elaborado por: (Autor).

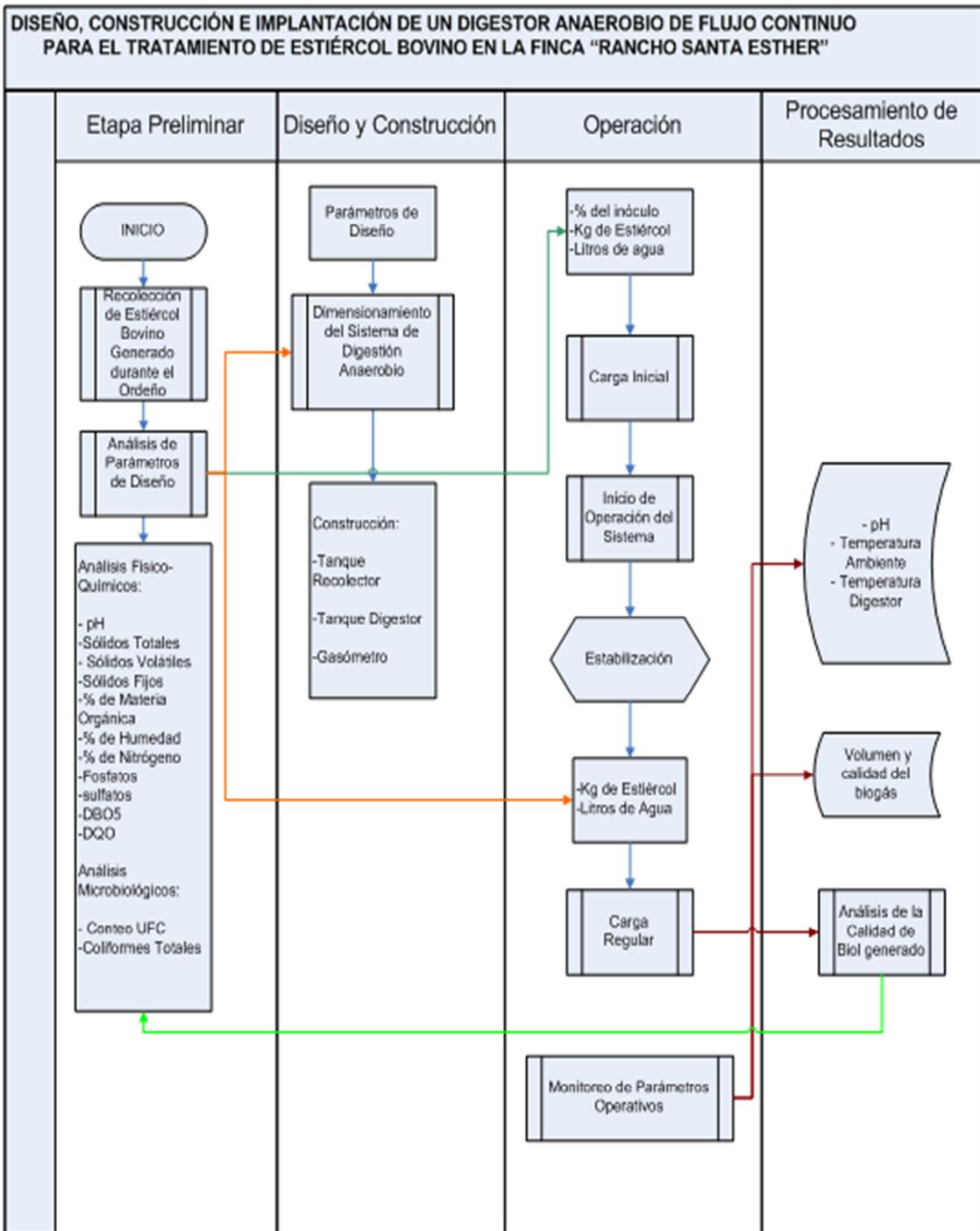
## **2.2 PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS.**

A continuación se describe los pasos que se siguieron en la realización de este proyecto basados en bibliografía que trata sobre digestión anaerobia, construcción de digestores, biofertilizantes y parámetros que deben ser controlados para la generación de biogás y biol: *BIODIGESTORES FAMILIARES GUÍA DE DISEÑO Y MANUAL DE INSTALACIÓN BIODIGESTORES DE POLIETILENO TUBULAR DE BAJO COSTO PARA TRÓPICO, VALLE Y ALTIPLANO; ENERGÍAS RENOVABLES; ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA APLICACIÓN EN PEQUEÑOS GANADEROS Y LECHEROS* escritos por Jaime Martí Herrero en 2008, Santiago Sánchez Miño en 2003 y Javier Pérez en 2010, respectivamente; pero siempre se tomó en cuenta las condiciones ambientales y de sustrato específicos para este caso.

### **2.2.1 Etapas del proyecto.**

En la Figura 2.1, se muestran las diferentes etapas que tuvo el proyecto realizado y a continuación se detallará cada uno de ellas.

A continuación Figura 2.1...



**Figura 2.2. Etapas del proyecto Diseño, construcción e implantación de un digestor anaerobio de flujo continuo para el tratamiento de estiércol bovino en la Finca "Rancho Santa Esther" Tulcán-Ecuador.**

Elaborado por: (Autor).

## 2.2.2 Etapa preliminar.

Esta etapa consistió en la evaluación del estiércol que se produce diariamente en la finca, mediante la determinación de la concentración de materia orgánica, porcentajes de nitrógeno, azufre y humedad, lo que permitió posteriormente dimensionar el sistema anaerobio y definir la carga inicial, las cargas regulares y la cantidad de agua para las respectivas mezclas.

### 2.2.2.1 Recolección y transporte de estiércol bovino.

Para asegurarse de que la muestra de estiércol sea representativa, se pidió a los encargados del ganado, que recolectaran el estiércol en dos baldes diferentes a la misma hora, como se lo explica en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Días de recolección de estiércol.**

<b>Número de Balde</b>	<b>Días de Recolección Abril/2012 a las 16:00</b>
Balde No. 1	Sábado, 07
	Lunes, 09
	Miércoles, 11
Balde No. 2	Viernes, 06
	Domingo, 8
	Martes, 10

Elaborado por: (Autor).

Posterior a ello, el día 11 de Abril se procedió a recolectar las muestras en dos diferentes frascos AIR-TIGHT, herméticos de 120 ml, la una en estado semisólido y la otra en estado líquido, en la misma que se realizó una dilución 1:10 (1ml en 10ml) con agua destilada. Los análisis que se realizaron fueron Sólidos totales (ST), Sólidos volátiles (SV), Sólidos fijos totales, DBO<sub>5</sub> y DQO, por lo cual los frascos fueron etiquetados e inmediatamente se almacenaron en un recipiente refrigerado aproximadamente a 4°C, hasta

su entrega al laboratorio de la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra, el día 12 de Abril del 2012.

### 2.2.2.2 Análisis elemental de estiércol.

Se realizó una caracterización físico-química y microbiológica de la muestra de estiércol con el fin de saber los porcentajes de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y cantidad de materia seca (los análisis detallados en la Tabla 2.2).

**Tabla 2.2. Análisis de laboratorio.**

<b>MUESTRA A SER ANALIZADA</b>		<b>MÉTODO</b>	<b>ESTIÉRCOL BOVINO</b>
<b>Análisis Físicos</b>	pH	Potenciométrico	✓
	Conductividad	Conductimétrico	✓
	Sólidos Totales	Gravimétrico	✓
	Sólidos Volátiles Totales	Gravimétrico	✓
	Sólidos Fijos Totales	Gravimétrico	✓
	Humedad	Pérdida por calcinación	✓
<b>Análisis Químicos</b>	Materia Orgánica % de Carbono	Pérdida por calcinación	✓
	Nitrógeno Total	Kjeldahl	✓
	Fosfatos (PO <sub>4</sub> )	Fotométrico	✓
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	Fotométrico	✓
	DBO <sub>5</sub>		✓
	DQO		✓
<b>Análisis Microbiológicos</b>	Coliformes totales	Conteo directo	✓
	UFC	Conteo directo	✓

Elaborado por: (Autor).

### **2.2.3 Diseño y construcción del equipo de digestión anaerobio continuo.**

El digestor anaerobio se diseñó determinando los parámetros para su funcionamiento, para lo cual se consideró los factores que intervienen en el proceso de degradación orgánica para este caso en particular.

#### **2.2.3.1 Determinación de los parámetros de diseño.**

A continuación, se detallan los parámetros que se consideraron para el diseño del digestor.

- Tipo de régimen.
- Necesidad de agitación mecánica.
- Volumen del digestor.
- Volumen funcional del digestor.
- Volumen de inóculo.
- Tiempo de retención estimado.
- Temperatura ambiente.
- Porcentaje de sólidos.
- Necesidad de aislante térmico.
- Necesidad de un tanque recolector.
- Necesidad de tanques para recolección de gas (gasómetro).

#### **2.2.3.2 Dimensionamiento del sistema de digestión anaerobio.**

- ***Tanque recolector.***

Para el dimensionamiento del tanque recolector, se planificó recoger el estiércol que se generó solamente durante la estancia del ganado en el ordeño, durante seis días, como lo muestra la Tabla 2.3.

La recolección se llevó a cabo a las 4:15 y 16:00 horas, debido a que se realiza dos veces por día el ordeño, momento en el cual el ganado deposita sus excretas en el establo y es del estiércol que se dispuso para la realización de este proyecto.

**Tabla 2.3. Registro de recolección y pesado de estiércol bovino generado en la Finca “Rancho Santa Esther”.**

FECHA	DÍA	HORA	OBSERVACIONES
06/04/2012	Viernes	4:15	La recolección de estiércol se la realizó durante el momento del ordeño y solo de lo que se acumuló en el potrero dos veces por día por el personal encargado.
		16:00	
07/04/2012	Sábado	4:15	
		16:00	
08/04/2012	Domingo	4:15	
		16:00	
09/04/2012	Lunes	4:15	
		16:00	
10/04/2012	Martes	4:15	
		16:00	
11/04/2012	Miércoles	4:15	
		16:00	

Elaborado por: (Autor).

- **Tanque digestor.**

Para el dimensionamiento del tanque digestor se tomaron en cuenta varios aspectos: volumen funcional del digestor, cálculo de la carga inicial y cálculo de la carga regular.

*Volumen funcional del digestor.* A partir del volumen del tanque digestor al que se tuvo acceso, se calculó el volumen funcional mediante la Ecuación 2.1.

$$V_f = V_t \times 0,75$$

**Ecuación 2.1**

Fuente: (Acosta, 2011)

Donde:

V<sub>f</sub>: Volumen funcional del digestor.

V<sub>t</sub>: Volumen total del digestor.

- **Carga inicial.**

- **Cálculo de la cantidad de inóculo.** El inóculo corresponde al 15% del volumen funcional, quedando así la Ecuación 2.2.

$$V_{in} = V_f \times 0,15$$

**Ecuación 2.2**

(López G., 1992).

Donde:

V<sub>in</sub>: Volumen del inóculo.

- **Cálculo de la carga del sustrato inicial.** En este se considera la relación C/N. Se tomó en cuenta el porcentaje de carbono y de nitrógeno tomados de los análisis de las heces y relacionándolos como muestra la Ecuación 2.3.

$$\frac{C}{N} = \frac{\text{Cantidad de carbono contenido en el estiércol bovino}}{\text{Cantidad de Nitrógeno contenido en el estiércol bovino}}$$

**Ecuación 2.3**

Fuente: (Acosta, 2011).

*Balance de masas para la carga inicial*

Se utilizó los porcentajes de humedad, materia seca y cantidad de estiércol, para realizar un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para determinar las cantidades de estiércol bovino y agua.

A continuación Tabla 2.4...

**Tabla 2.4. Datos para el cálculo de cantidades de sustrato para carga inicial.**

COMPONENTE	Datos	Unidades	Símbolo
AGUA	Fracción del % de Humedad	-	$X_{HA}$
	Fracción del % de Materia seca	-	$X_{MSA}$
	Volumen de agua a ingresar al digestor	Litros <sup>5</sup>	$Q_A$
ESTIÉRCOL BOVINO	Fracción del % de Humedad	-	$X_{HEB}$
	Fracción del % de Materia seca	-	$X_{MSEB}$
	Volumen de estiércol bovino a ingresar al digestor	kg	$Q_{EB}$
MEZCLA	Fracción del % de Humedad	-	$X_{HM}$
	Fracción del % de Materia seca	-	$X_{MSM}$
	Volumen del sustrato <sup>6</sup>	Litros	$Q_M$

Elaborado por: (Autor).

*Balance de masa utilizando humedad*

$$[(X_{HA}) \times (Q_A)] + [(X_{HEB}) \times (Q_{EB})] = [(X_{HM}) \times (Q_M)]$$

*Balance de masa utilizando materia seca*

$$[(X_{MSA}) \times (Q_A)] + [(X_{MSEB}) \times (Q_{EB})] = [(X_{MSM}) \times (Q_M)]$$

**Ecuación 2.4**

Fuente: (Acosta, 2011).

- **Carga regular.**
  - **Cálculo del caudal diario de entrada y salida.**

Para calcular el caudal diario que debe ser cargado y por tanto también descargado del digestor, se utilizó la Ecuación 2.5.

$$V_f = Q_{Md} \times \theta h$$

Continúa...

<sup>5</sup> Densidad del agua= 1kg/L.

<sup>6</sup> Volumen de sustrato ( $Q_M$ )= volumen funcional-volumen de inculo.

$$Q_{Md} = \frac{Vf}{\theta h}$$

### Ecuación 2.5

Fuente: (Acosta, 2011).

Donde:

Vf: volumen funcional del digestor

$Q_{Md}$ : Caudal de entrada de sustrato

$\theta h$ : Tiempo de retención

*Balance de masa para la carga regular.*

Al igual que para la carga inicial, en la carga regular se utilizó un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para conocer la cantidad de estiércol bovino y agua que deben ingresar por día al digestor anaerobio, utilizando la Ecuación 2.6.

**Tabla 2.5. Datos para el cálculo de sustrato para la carga regular.**

COMPONENTE	Datos	Unidades	Símbolo
Agua	Fracción del % de Humedad	-	$X_{HA}$
	Fracción del % de Materia seca	-	$X_{MSA}$
	Volumen de agua a ingresar al digestor	Litros <sup>7</sup>	$Q_A$
Estiércol Bovino	Fracción del % de Humedad	-	$X_{HEB}$
	Fracción del % de Materia seca	-	$X_{MSEB}$
	Volumen de estiércol bovino a ingresar al digestor	kg	$Q_{EB}$
Mezcla Diaria	Fracción del % de Humedad	-	$X_{HM}$
	Fracción del % de Materia seca	-	$X_{MSM}$
	Volumen del sustrato <sup>8</sup>	Litros	$Q_{Md}$

Elaborado por: (Autor).

<sup>7</sup> Densidad del agua= 1kg/L

<sup>8</sup> Caudal de entrada de sustrato L/d

*Balance de masa utilizando humedad*

$$[(X_{HA}) \times (Q_A)] + [(X_{HEB}) \times (Q_{EB})] = [(X_{HM}) \times (Q_{Md})]$$

*Balance de masa utilizando materia seca*

$$[(X_{MSA}) \times (Q_A)] + [(X_{MSEB}) \times (Q_{EB})] = [(X_{MSM}) \times (Q_{Md})]$$

**Ecuación 2.6.**

(Acosta, 2011).

- **Gasómetro.**

Para el dimensionamiento de los tanques que conformaron el sistema de almacenamiento de gas, se realizó el cálculo de la producción teórica de biogás, para ello se utilizó el método de sólidos volátiles indicado por (Jarauta, 2005) y (Martí J., 2008).

- **Cálculo de la producción diaria de gas.** La estimación del volumen de gas que se generaría durante la digestión anaerobia, se la determinó así:

$$ST = \frac{(carga\ regular\ de\ estiércol\ kg) \times 0,17^9}{Q\ m^3}$$

**Ecuación 2.7.**

Fuente: (Martí, 2008).

$$SV = (ST) \times 0,77^{10}$$

**Ecuación 2.8.**

Fuente: (Martí, 2008).

$$Producción\ de\ Biogás\ (PB) = (0,13)^{11} \times SV$$

**Ecuación 2.9.**

Fuente: (Martí, 2008) (Ramírez, 2010).

---

<sup>9</sup> Porcentaje de sólidos totales que de forma general se ha determinado en estiércol fresco bovino. Rango 13-20% óptimo 17%.

<sup>10</sup> Porcentaje de sólidos volátiles que de forma general se ha determinado en estiércol fresco bovino.

<sup>11</sup> Potencial de producción de metano 0,13m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV para ganado vacuno lechero (Ramírez, 2010).

$$PB/día = (0,6 m^3)^{12} \times PB$$

**Ecuación 2.10.**

Fuente: (Martí, 2008).

Donde:

ST: Sólidos Totales

SV: Sólidos Volátiles

PB: producción de biogás

**2.2.3.3 Construcción y armado del digester anaerobio.**

A continuación en la Tabla 2.6 se mencionan los materiales y accesorios que se utilizaron para la construcción y armado del sistema anaerobio planteado para este proyecto.

**Tabla 2.6. Lista de materiales utilizados en la construcción y armado del sistema anaerobio para el tratamiento de estiércol bovino en la Finca “Rancho Santa Esther”.**

Accesorios	Cantidad	Accesorios	Cantidad
Abrazaderas	24	Pintura spray negro	1
Abrazaderas (8mm)	8	Plástico de polietileno negro	7 m
Acople de 1”	1	Platina de hierro (1 1/2 “x 1/4”)	2
Adaptador de 1/2”	1	Rasqueteador N° 8	1
Adaptador de 1/2”	2	Rodelas de 1/2”	2
Adaptador de rosca	1	Rodelas de 3/8”	8
Adaptador PVC de 2”	1	Rodelas de 9/16	4
Adaptador tanque de 2”	1	Rollos de lana de vidrio	2
Alambre galvanizado	1	Silicón transparente	1
Barrilla de eje de transmisión con roscas en las dos puntas	1m	Tanque digester IBC	1
Broca de 3/8”	1	Tarraja 1/2”	1
Bushin 1 1/2	1	Tee 1/2”	1
Bushin 3/4”	2	Tee PVC desagüe	1
Caneca de 120 L	1	Termómetro ambiental	1
Cinta teflón 1/2”	10	Tornillos para madera	18

<sup>12</sup> Volumen funcional del digester 600 Litros

Continúa...

Codo PVC desagüe	2	Tuercas	1
Codo cachimba 1/2"	3	Tuercas de 1/2"	2
Codo de 1/2"	8	Tuercas de 9/16"	2
Codo de rosca de 2"	1	Tuercas (10 x1,50mm)	4
Control de Termocupla	1	Tubo PVC de 1/2"	1
Funda de lana de vidrio	1	Unión PVC	1
Funda de tornillos	1	Unión 1 1/4"	1
Guantes de látex	1	Unión de 1/2 "	2
Juego de llaves TRUPER	1	Unión de 2"	1
Kit de brocas redondas	1	Unión de 3/4"	1
Llave de cadena	1	Unión flex 1/2"	6
Manguera de presión para gas	1	Unión IPS de 2"	1
Manguera vinil de 1/2"	3	Universal de 2"	1
Neplo corrido 1 1/4"	1	Válvula de compuerta	1
Neplo de 1"	2	Válvula de esfera 1"	1
Neplo de 2"	1	Válvula de esfera 1/2"	6
Pegante PVC POLIPEGA	2	Télex 1/2"	1
Perno de (25x1,50)	1	Grapa plástica	2
Pernos de acero inoxidable con arandelas y tuercas	4		

Elaborado por: (Autor).

#### 2.2.3.4 Determinación de posibles fallas en el sistema anaerobio construido.

Se llenó el digestor con agua para verificar que no exista escape de líquido en la salida de biol y de lodos. Para comprobar la hermeticidad de gas en el sistema, se introdujo aire a presión con un compresor marca CAMPBEL HAUSFELF FP2031 de 125 psi, desde la unión de la válvula de seguridad hacia el digestor y el gasómetro. Adicionalmente, con agua jabonosa en las salidas y conexiones se observaron pequeñas burbujas en los puntos de escape (Acosta, 2011).

## 2.2.4 Operación del equipo de digestión anaerobio continuo.

### 2.2.4.1 Parámetros de operación.

El sistema fue operado y monitoreado desde que se realizó el llenado del tanque digestor con el inóculo y la carga inicial, hasta el día en que se finalizó el proyecto con la obtención de un volumen regular de biogás y con los respectivos muestreos de biol y gas.

Las cargas regulares fueron realizadas por los trabajadores de la finca, previamente capacitados para recolectar y homogenizar el estiércol, registrar el pH, cargar al digestor y retirar el biol correspondiente a cada día previo a la carga. Todo fue detallado en el instructivo de operación y monitoreo del digestor que se encuentra en el ANEXO D.

A continuación en la Tabla 2.7, se detallan los parámetros de operación que fueron registrados durante la realización del proyecto.

**Tabla 2.7. Valores de referencia para los parámetros de operación.**

Parámetro evaluado	Valor de referencia
pH	6 – 8,5.
H <sub>2</sub> S	Presencia de olor a huevo podrido.
Volumen de biogás	Tanque de almacenamiento vacío. Tanque de almacenamiento lleno.
Temperatura digestor	10°C – 30°C.
Fugas	Presencia de fugas. No presencia de fugas.

Elaborado por: (Autor).

### 2.2.4.2 Carga inicial.

La carga inicial consistió en inóculo y sustrato, el 50% del volumen del inóculo fue lodo recogido de los almacenamientos de agua cercana (agua empozada) y el 50% restante fueron heces recolectadas días antes y fermentadas al sol durante 5 días (López G., 1992).

Junto con el inóculo se cargó el sustrato compuesto solamente de agua y estiércol fresco, que se mantuvieron condiciones aerobias durante 5 días en el tanque digestor para la estabilización de las bacterias acidogénicas (Guevara, 1996) citado por (Acosta, 2011).

#### **2.2.4.3 Estabilización.**

En el período de adaptación y crecimiento de las bacterias anaerobias, no se realizó cargas regulares, pero siempre se mantuvo el monitoreo de los parámetros operativos.

#### **2.2.4.4 Carga regular.**

La carga regular se realizó diariamente, después de la etapa de estabilización hasta la finalización del proyecto. Como se mencionó anteriormente fueron los trabajadores los que se encargaron de realizar las cargas regulares y el control de los parámetros que diariamente fueron registrados en la bitácora como se observa en el ANEXO G.

### **2.2.5 Análisis de productos obtenidos.**

#### **2.2.5.1 Análisis de la calidad de biol y biogás generado.**

A continuación se presenta en la Tabla 2.8, los análisis realizados a los productos finales de la digestión anaerobia.

**Tabla 2.8. Análisis de biogás y biol generado.**

<b>Muestra a ser analizada</b>		<b>Biol (muestra líquida)</b>	<b>Biogás</b>
<b>Análisis Físicos</b>	pH	✓	
	Conductividad	✓	
	Sólidos Totales	✓	
	Sólidos Volátiles Totales	✓	

Continúa...

<b>Análisis Físicos</b>	Sólidos Fijos Totales	✓	
	Humedad	✓	
	Temperatura	✓	✓
<b>Análisis Químicos</b>	Materia Orgánica % de Carbono	✓	
	Nitrógeno Total	✓	
	Fosfatos (PO <sub>4</sub> )	✓	
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> )		
	DBO <sub>5</sub>	✓	
	DQO	✓	
<b>Análisis De Emisiones Gaseosas</b>	Metano		✓
	Dióxido de Carbono		✓
	Monóxido de Carbono		✓
	Dióxido de Azufre		✓
	Monóxido de Nitrógeno		✓
	Oxígeno		✓
	Volumen		✓
<b>Análisis Microbiológicos</b>	Coliformes totales	✓	
	UFC	✓	

Elaborado por: (Autor).

### 2.2.5.2 Análisis de eficiencia de la digestión anaerobia.

Para el análisis de eficiencia se empleó los resultados obtenidos tanto del estiércol y del biol que resulta ser el producto de la digestión, tomándose en cuenta los valores de DQO, DBO<sub>5</sub> y Sólidos Totales. Para ello se utilizó la Ecuación 2.11.

A continuación Ecuación 2.11...

$$\text{Porcentaje de eficiencia} = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100$$

**Ecuación 2.11.**

(Acosta, 2011).

Donde:

Co: concentración afluente

Cf: concentración efluente

### **2.3 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE DATOS.**

Se realizó un análisis descriptivo de todos los datos obtenidos durante la realización de este proyecto, para ello se empleo el programa Excel 2010, que también facilitó la utilización de herramientas gráficas.

A la par se realizó el cálculo de la media aritmética en relación con el volumen de gas producido, lo que llevó a una estimación por intervalos y subsecuentemente al rechazo o aceptación de la hipótesis nula.

## CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 ETAPA PRELIMINAR.

Durante esta etapa se recolectó y se evaluó las características propias del estiércol generado, además se analizó la cantidad de excretas de las que se disponía, para posterior a ello dimensionar el equipo y determinar el tipo de alimentación que mejor convenía.

#### 3.1.1 Recolección de estiércol bovino.

- Antes de realizar la recolección del estiércol bovino fue necesario saber el tipo de ganado del que disponía la Finca “Rancho Santa Esther”, determinándose que contaba con ganado vacuno lechero de las razas Jersey, Swiss Roja y Holstein siendo esta la más numerosa con 77 ejemplares de un total de 98, debido a que como menciona INEC (2002), entre otras cosas es la raza más popular, económica y adaptada a climas fríos.
- Se interrogó al personal encargado, acerca del alimento del ganado, llegando a la conclusión de que ingieren la mayor parte del año una mezcla de gramíneas y leguminosas, que tal como lo menciona Bernal (2005), es una combinación óptima; entre las que se encontraban; Ballica nui, Rye Grass perenne, trébol blanco, trébol rojo, llantén y kikuyo propio de la zona, además de melaza, zanahorias, restos de papas y plátano; esto sobretodo en los meses de julio, agosto y principios de septiembre donde hay sequía y el pasto no es suficiente; se informó también que el ganado no es estabulado, es decir, que rota por varios establos alrededor de la finca consumiendo su alimento todo el día, de tal forma que regresa al sitio de partida a los 21 días, y solamente ingresa al establo del ordeño dos veces por día a horas determinadas.
- Con los datos obtenidos, como se muestra en la Tabla 2.1, se diseñó un cronograma de recolección de estiércol, de tal forma que coincida con el ingreso del ganado al ordeño; para de esta manera obtener una muestra que sea

representativa, para que los análisis revelen las verdaderas características de las heces; puesto que como mencionan Sierra y Rojas (2010), Ganadero (2007) y García (2000), varios son los factores que afectan la composición química y las relaciones C/N del estiércol.

### **3.1.2 Análisis elemental de estiércol.**

- El análisis elemental del estiércol sirvió para tener una noción sobre las características generales del sustrato a tratar durante la digestión anaerobia, (Jarauta, 2005). Los resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos, entregados por el laboratorio de la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra (PUCE-SI), se muestran en el ANEXO A.
- Como bien lo menciona Bavera & Peñafort (2006), la heces bovinas difieren de casi todas las especies animales por su alto contenido de agua, lo que corrobora el haber obtenido 89,12% de humedad. Además al haberse presentado las heces con una consistencia de “papilla” espesas, indica que el ganado disponía de una dieta balanceada, una correcta masticación, rumiación e insalivación debido a que la estratificación que forma en el rumen es apropiada, demostrándose así con un pH de 6,8.
- Con una digestibilidad del 60 al 65% del alimento ingerido (Bavera & Peñafort, 2006), que implica tener elementos no digeridos, que se traducen en 10,88% de sólidos totales; que Jarauta (2005), cataloga como un contenido bajo en sólidos, pero aún así dentro del rango apropiado para una digestión anaerobia.
- En cuanto a la DBO<sub>5</sub> y DQO, que representan indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente o biológicamente la materia orgánica; los resultados que se observan en la Tabla 3.1 se presentan dentro de los rangos, sin embargo en el caso de la DBO<sub>5</sub>, los resultados obtenidos exceden en 1 100 mgO<sub>2</sub>/L, lo que podría causar un efecto de lavado de las bacterias es decir salen del reactor con la

corriente de salida, aumentar moderadamente la presencia de ácidos volátiles e incrementar moderadamente la producción de gas (Jarauta, 2005).

- Los análisis de los porcentajes de Nitrógeno, Fósforo y Carbono que son importantes dentro de la relación óptima de nutrientes, muestran que el Nitrógeno estuvo dentro del rango óptimo señalado por Jarauta (2005), sin embargo en el caso del carbono, este estuvo fuera del rango, lo que indicó que para que exista una relación óptima de C/N deberá realizarse una dilución de las excretas el momento de su ingreso al digestor, con el fin de mantenerse dentro de los rangos de la relación de C/N que van desde 15/1 - 45/1 siendo mejor entre 20/1-30/1.(López A., 2009).
- El análisis microbiológico, demostró que los resultados de UFC de *E. coli* y de coliformes totales, muy numerosas para ser contadas, concluida la digestión anaerobia su número debería disminuir (De La Torre, 2008).

**Tabla 3.1. Resultados del análisis de la Finca Vs. Resultados referenciales.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado Estiércol</b>	<b>Resultado Bibliografía</b>	<b>Fuente Bibliográfica</b>
pH	-	6,8	6-6,5	(Bavera & Peñafort, 2006).
Humedad	%	89,12	-	(Bavera & Peñafort, 2006).
Sólidos Totales	%	10,88	10-40	(Jarauta, 2005).
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	8100	3000-7000	(Jarauta, 2005).
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	9638	5000-12000	(Jarauta, 2005)
Nitrógeno	%	1,35	1,8 1,7 1,7 0,5	(Maramba, F) citado por (Jarauta, 2005). (Barnett, A. et al) citado por (Jarauta, 2005). Kaltwasser, B) citado por (Jarauta, 2005). (Sierra & Rojas, 2010).
Fósforo	%	0,53	0,29	(Sierra & Rojas, 2010).
Carbono	%	98,12	-	-

Elaborado por: (Autor).

### 3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE DIGESTIÓN ANAEROBIO CONTINUO.

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización del estiércol bovino, se procedió a diseñar y posteriormente a construir el equipo de digestión anaerobio, para ello se tomaron en cuenta varios factores que se muestran a continuación.

#### 3.2.1 Determinación de los parámetros de diseño.

La Tabla 3.2 muestra los parámetros que se analizaron en el diseño, para poder comenzar con la construcción del tanque digestor.

**Tabla 3.2. Parámetros del digestor.**

Parámetro	Valor
Régimen	Continuo
Agitación mecánica	No
Volumen del digestor	1000 Litros
Volumen funcional	75%
Volumen de inóculo	15% <sup>13</sup>
Tiempo de retención	> 60 días
Temperatura ambiente	12 -18 ° C
Porcentaje de sólidos	5% <sup>14</sup>
Aislante térmico	Si
Tanque colector	Si
Tanque gasómetro	Si

Elaborado por: (Autor).

---

<sup>13</sup> (Acosta, 2011).

<sup>14</sup> (López G., 1992).

Debido a que el estiércol bovino es generado todos los días, se determinó que el régimen de alimentación al tanque digestor debía ser continuo; no se consideró tener agitación mecánica, principalmente por razones de tamaño del tanque (1000 Litros) y a factores económicos; 75% del volumen total fue determinado como “volumen funcional” es decir volumen tope al que se llenaría el digestor (Metcalf & Eddy, 1991); finalmente por recomendaciones de López G (1992), se decidió contar con un 15% de inóculo para un buen inicio de la digestión anaerobia.

El tiempo estimado de retención hidráulica fue de 60 días, debido a que como Martí J. (2008), menciona en su libro *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*, constituye un período referencial para climas fríos, pues gracias a la información del Instituto de Meteorología e Hidrología, se esperaba tener temperaturas entre 12 y 18°C como las mas altas en la Finca “Rancho Santa Esther”, esto justifica también porque se decidió colocar un sistema aislante con fibra de vidrio, pues se necesitaba retener la mayor cantidad de calor dentro del digestor especialmente durante la noche.

Al hablar de una proporción adecuada de sólidos totales para la entrada al proceso de degradación anaerobia, Jarauta (2005) recomienda que sea entre 10-40%, sin embargo, López G. (1992) menciona que cuando la cantidad de materia orgánica es muy alta puede llegar a ser de hasta 5%; como muestra la Tabla 3.1 el porcentaje de carbono era muy alto, se decidió por tanto que el porcentaje de sólidos sería del 5%.

Una vez observado el modo en el que opera la Finca, se vió la necesidad de tener un tanque recolector, pues daba la oportunidad de ir recolectando el estiércol que se generaba en el día.

Finalmente, también se consideró la construcción de un tanque gasómetro que recolectaría el gas obtenido durante la digestión anaerobia.

### 3.2.2 Dimensionamiento del sistema de digestión anaerobio.

#### 3.2.2.1 Tanque recolector.

En la Tabla 3.3, se muestran los resultados de la producción de estiércol durante seis días, donde se obtuvo un total de 131,3 kg con un promedio de 21,9 kg de excretas por día.

**Tabla 3.3. Producción por día de estiércol bovino Finca “Rancho Santa Esther”.**

Fecha	Hora de Recolección	kg de Estiércol	kg Estiércol/Día
06/04/2012	4:15	8	20
	16:00	12	
07/04/2012	4:15	9	23,5
	16:00	14,5	
08/04/2012	4:15	7,6	20,6
	16:00	13	
09/04/2012	4:15	10,4	19,4
	16:00	9	
10/04/2012	4:15	11,8	22,4
	16:00	10,6	
11/04/2012	4:15	13,4	25,4
	16:00	12	
<b>Promedio</b>			<b>21,9</b>
<b>TOTAL (kg estiércol/6 días)</b>			<b>131,3</b>

Elaborado por: (Autor).

Esta cantidad de excretas obtenidas por día, difiere de la registrada en Botero & Preston (1987), Gonzáles & Sandoval (2005), Martí J. (2008), entre otros textos que tratan de diseño de digestores, en donde se toma en cuenta el peso del animal y el número total de ellos; sin embargo esto puede explicarse ya que el estiércol que se recolectó, pesó y registró, es solamente del lapso en el que el ganado entra al ordeño. El proceso de ordeño tiene una duración entre una hora a una hora y cuarto máximo, se pudo observar que no todas las vacas evacuan en ese instante, ya que para llegar recorren un largo trayecto durante el cual van liberando las excretas dificultándose su recolección.

Para la realización de este proyecto se tuvo acceso a varios tanques de 200 Litros marca PLASTIGAMA, una vez analizado que en promedio se obtenía 21,9 kg estiércol/día, se decidió que se utilizaría uno de ellos para destinarlo a ser tanque recolector (Figura 3.1) y en el ANEXO B se muestran las especificaciones técnicas de su adaptación.



**Figura 3.1. Fotografía del Tanque recolector. Capacidad 200L. Junio 2012**

Elaborado por: (Autor).

### **3.2.2.2 Tanque digestor.**

Se disponía de un tanque de 1000 Litros de capacidad, el cual se adaptó a las necesidades de la Finca, con las respectivas especificaciones de construcción que se detallan en el ANEXO B.

#### **Volumen funcional del digestor.**

Con la Ecuación 2.1, se calculó el volumen funcional del tanque digestor.

Obteniendo, un valor de 750 Litros que será el máximo a llenarse con la mezcla de estiércol y agua.

- **Carga inicial.**

- **Cálculo de la cantidad de inóculo.** Con la Ecuación 2.2, se calculó el inóculo correspondiente al 15% del volumen funcional que es de 750 Litros, quedando:

$$V_{in} = 750 \times 0,15 = 112,5 \approx \mathbf{113 L.}$$

Obteniéndose 113 Litros de inóculo, de los cuales el 50% fue lodo recogido de los almacenamientos de agua cercanos a la Finca, y el 50% restante fueron heces recolectadas con anticipación y dejadas fermentar al sol.

- **Cálculo de la carga del sustrato inicial.**

*Relación C/N.* Con los resultados de los análisis del estiércol, se observan en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4. Datos para el cálculo de relación C/N del estiércol.**

Datos	Unidades	Estiércol
Porcentaje de Carbono	%	98
Porcentaje de Nitrógeno	%	1,35

Elaborado por: (Autor).

Y utilizando la Ecuación 2.3, se calculó la relación C/N:

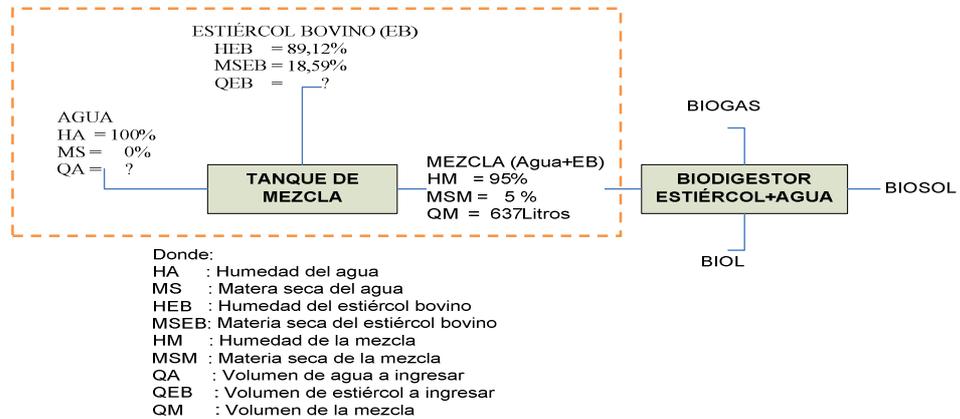
$$\frac{C}{N} = \frac{98}{1.35} = 72,59 \approx \mathbf{72.}$$

Se ajustó a la relación óptima de entre 20-30, escogiéndose 25 (López G., 1992).

Mediante la siguiente relación se determinó el factor de dilución que se consideró para la carga regular (Acosta, 2011).

$$\frac{C/N (obtenida)}{C/N (óptima)} = \frac{72}{25} = \mathbf{2,88 \approx 3.}$$

*Balace de masa para la carga inicial.* Con los resultados obtenidos del análisis de excretas, se realizó un diagrama de balance de masas (Figura 3.2), quedando de la siguiente manera:



**Figura 3.2. Diagrama de balance de masas.**

Elaborado por: (Autor).

**Tabla 3.5. Datos para el cálculo de cantidades de sustrato para carga inicial.**

Componente	Datos	Unidades	Valor
AGUA	Fracción del % de Humedad	-	1
	Fracción del % de Materia seca	-	0
	Volumen de agua a ingresar al digestor	Litros <sup>15</sup>	$Q_A$
ESTIÉRCOL BOVINO	Fracción del % de Humedad	-	0,8912
	Fracción del % de Materia seca	-	0,1859
	Volumen de estiércol bovino a ingresar al digestor	kg	$Q_{EB}$
MEZCLA	Fracción del % de Humedad	-	0,95
	Fracción del % de Materia seca	-	0,05
	Volumen del sustrato <sup>16</sup>	Litros	637

Elaborado por: (Autor).

<sup>15</sup> Densidad del agua= 1kg/L.

<sup>16</sup> Volumen de sustrato ( $Q_M$ )= volumen funcional-volumen de inoculo.

Además se utilizó la Ecuación 2.4, así:

*Balance de masa utilizando humedad*

$$[(1) \times (Q_A)] + [(0,8912) \times (Q_{EB})] = [(0,95) \times (637)]$$

*Balance de masa utilizando materia seca*

$$[(0) \times (Q_A)] + [(0,1859) \times (Q_{EB})] = [(0,05) \times (637)]$$

Donde:

$$Q_{EB} = 171,33 \text{ y } Q_A = 452,46$$

La relación agua/estiércol:  $Q_A/Q_{EB} = 2,64$

Las cantidades obtenidas de estiércol y agua se presentan en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6. Cantidad de sustrato para la carga inicial del digestor.**

<b>Tipo</b>	<b>Cantidad</b>
Estiércol bovino	171 kg
Agua	452 Litros

Elaborado por: (Autor).

- ***Carga regular.***
- ***Cálculo del caudal diario de entrada y salida.***

Con la Ecuación 2.5 se calculó el caudal diario, que fue cargado y descargado del digestor, así:

$$Q = \frac{Vf}{\theta h} = \frac{750 L}{60 d^{17}} = 12,5 \approx 13 \frac{L}{d}$$

---

<sup>17</sup> (Martí J., Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares, 2008).

*Balance de masas para la carga regular.* Con los datos obtenidos, al igual que con la carga inicial, se completó la Tabla 2.5, con el fin de saber la cantidad de agua y estiércol que ingresarían al digestor diariamente, además se utilizó la Ecuación 2.6, quedando la información de la siguiente manera:

**Tabla 3.7. Datos para el cálculo de sustrato para la carga regular.**

Componente	Datos	Unidades	Valor
AGUA	Fracción del % de Humedad	-	1
	Fracción del % de Materia seca	-	0
	Volumen de agua a ingresar al digestor	Litros <sup>18</sup>	$Q_A$
ESTIÉRCOL BOVINO	Fracción del % de Humedad	-	0,8912
	Fracción del % de Materia seca	-	0,1859
	Volumen de estiércol bovino a ingresar al digestor	kg	$Q_{EB}$
MEZCLA	Fracción del % de Humedad	-	0,95
	Fracción del % de Materia seca	-	0,05
	Volumen del sustrato <sup>19</sup>	Litros	13

Elaborado por: (Autor).

*Balance de masa utilizando humedad*

$$[(1) \times (Q_A)] + [(0,8912) \times (Q_{EB})] = [(0,95) \times (13)]$$

*Balance de masa utilizando materia seca*

$$[(0) \times (Q_A)] + [(0,1859) \times (Q_{EB})] = [(0,05) \times (13)]$$

Donde:

$$Q_{EB} = 3,49 \approx 3,50 \text{ y } Q_A = 9,23 \approx 9$$

<sup>18</sup> Densidad del agua= 1kg/L.

<sup>19</sup> Volumen de sustrato ( $Q_M$ )= volumen funcional-volumen de inculo.

La relación agua/estiércol:  $Q_A/Q_{EB} = 2,64$ .

Las cantidades obtenidas de estiércol bovino y agua se presentan a continuación en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8. Cantidad de sustrato para la carga regular del digestor.**

<b>Tipo</b>	<b>Cantidad</b>
Estiércol bovino	3,5 kg
Agua	9 Litros

Elaborado por: (Autor).

### 3.2.2.3 Gasómetro.

- *Cálculo del volumen de CH<sub>4</sub>.*

Para poder realizar el cálculo del volumen de CH<sub>4</sub>, se tomaron en cuenta los datos de la Tabla 3.8.

Utilizando la Ecuación 2.7, se obtuvo:

$$ST = \frac{(3,5 \text{ kg}) \times 0,17}{0,6 \text{ m}^3} = \mathbf{0,99 \text{ kg/m}^3}$$

Con la Ecuación 2.8, se calculó la cantidad de sólidos totales.

$$SV = \left(0,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times 0,77 = \mathbf{0,762 \text{ kg/m}^3}$$

Finalmente la producción de biogás que se obtendría por día, se calculó con la Ecuación 2.9.

$$PB = (0,13) \times 0,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{0,099 \text{ m}^3 \text{ biogas.}}$$

Mediante la Ecuación 2.10, para un digestor con un volumen funcional de  $0,750 \text{ m}^3$ , significa que cada día se va a producir:

$$PB/día = (0,750 \text{ m}^3) \times 0,099 = \mathbf{0,074 \text{ m}^3} = \mathbf{74,25 \text{ Litros}}.$$

A partir de esta producción de biogás (74,25 L) se diseñó un sistema de almacenamiento de 120 Litros, puesto que se disponía de una caneca plástica de este volumen.

### **3.2.3 Construcción y armado del digestor anaerobio.**

Parte de la construcción y adaptación de accesorios del digestor, se realizaron en Quito, para finalmente instalarlo en el terreno en la Finca (Figura 3.5). La descripción del proceso de construcción y armado se presenta a continuación y los planos del sistema anaerobio se observan en el ANEXO D.

#### **3.2.3.1 Tanque de almacenamiento de estiércol.**

Se adaptó un tanque cilíndrico vertical azul marca PLASTIGAMA de 55 galones (200 Litros) de capacidad, usado para el almacenamiento de hipoclorito de sodio. La tapa superior fue cortada dejándolo totalmente abierto (Figura 3.3) y en la parte inferior del tanque se colocó un adaptador, conectado a una válvula de compuerta y este a un tubo de PVC; todo esto para controlar la entrada de estiércol mezclado con agua hacia el tanque digestor.

#### **3.2.3.2 Digestor.**

Se adaptó un tanque cuadrado de  $1\text{m}^3$  (1000 Litros) de capacidad, usado anteriormente para el almacenamiento de químicos, el cual fue lavado previamente (Figura 3.4). En la tapa que viene con el digestor se colocó un adaptador de manera que pueda ser colocado un tubo PVC de 2", para ser utilizado como entrada de estiércol tanto en la carga inicial como en las cargas regulares. El tanque cuenta con una válvula en la

base, al cual se le colocó un adaptador y una unión para la salida de los lodos de digestión, además se realizó dos orificios más, para la salida del fertilizante líquido y otro para el control de la temperatura (sensor termocupla).

### **3.2.3.3 Gasómetro o sistema de almacenamiento de biogás.**

El sistema consta de dos tanques de polietileno azules marca PLASTIGAMA (Figura 3.7). Al primer tanque cilíndrico vertical de 200 Litros, se le colocó en la parte más baja un adaptador conectado a una válvula de bola, para el desfogue de agua; además cuenta con otro adaptador que se conectó con el tanque digestor por un tubo de PVC por donde ingresa el biogás. El otro tanque de 120 litros, actúa como campana y almacena el biogás, cuenta con un adaptador conectado a una manguera para la salida del gas; además tiene un orificio en la mitad por donde entra un eje que guía la subida/bajada del tanque esto unido a un armazón de metal que le proporciona estabilidad, cabe mencionar que el eje se eleva o desciende por fuera garantizando así que el tanque campana esta sellado para evitar cualquier posible fuga de gas.

### **3.2.3.4 Accesorios.**

Para la regulación de la entrada de estiércol se utilizó una válvula de compuerta y cerca de la entrada al tanque digestor se colocó una “Y” de PVC, con su respectivo tapón roscado para colocar el regulador de pH o realizar una recirculación de ser necesario. El tanque digestor cuenta con un panel de control en el que están colocados el sensor de temperatura interna (termocupla) y el termómetro (Figura 3.6). Finalmente la tubería de salida del biogás cuenta con un filtro para el tratamiento de sulfuro de hidrógeno.

Los criterios técnicos y otras especificaciones del tanque recolector, tanque digestor, gasómetro y accesorios están adjuntos en el ANEXO B.



**Figura 3.3. Fotografía de la adaptación de tanques. Mayo 2012. Elaborado por: (Autor).**



**Figura 3.4. Fotografía del tanque digestor con el forro de lana de vidrio. Mayo.2012. Elaborado por: (Autor).**



**Figura 3.5. Fotografías de la instalación del digestor en la Finca. Mayo 2012. Elaborado por: (Autor).**



**Figura 3.6. Fotografía de la termocupla y termómetro ambiental. Elaborado por: (Autor).**



**Figura 3.7. Fotografía del sistema anaerobio instalado en la Finca “Rancho Santa Esther”. Mayo 2012. Elaborado por: (Autor).**

### **3.3 OPERACIÓN DEL EQUIPO DE DIGESTIÓN ANAEROBIO CONTINUO.**

#### **3.3.1 Monitoreo de parámetros operativos.**

El sistema fue operado y monitoreado durante 107 días, periodo en el cual se fueron registrando las mediciones de los parámetros operativos como se observa en el ANEXO G.

A continuación Tabla 3.9...

**Tabla 3.9. Acción a realizada de acuerdo al parámetro de control evaluado.**

<b>Parámetro evaluado</b>	<b>Valor de reacción</b>	<b>Acción a realizarse</b>
pH	< 6	Regulación de pH con recirculación. <sup>20</sup>
pH	<5	Regulación de pH sin recirculación. <sup>21</sup>
H <sub>2</sub> S	Presencia de olor a huevo podrido	Cambio de filtro que contiene la limalla de hierro.
Volumen de biogás	Tanque de almacenamiento lleno	Utilizar el gas/ dejar que escape.
Volumen de biogás	No se observa acumulación de biogás	Revisar las válvulas/agregar mayor cantidad de excretas y no tanta agua
Temperatura	< 10°C	Construir un invernadero con plástico.

Elaborado por: (Autor).

### **3.3.2 Carga inicial.**

El llenado del tanque digester con la carga inicial y el inóculo previamente calculados, se lo realizó entre los días 24 al 27 de Mayo del 2012, para ello se cargó completamente el tanque de recolección, con el agua empozada, heces previamente dejadas fermentadas al sol y estiércol fresco, (Figura 3.8); hasta completar 750 Litros del tanque digester, como se había previsto. Durante estos cuatro días se mantuvo la tapa abierta, se registró la temperatura ambiente y el pH de las heces.

A continuación Figura 3.8...

---

<sup>20</sup> Tomado como referencia de (Acosta, 2011).

<sup>21</sup> Tomado como referencia de (Acosta, 2011).



### 3.3.3 Estabilización.

Posterior a la carga inicial se selló el tanque y se inició con el proceso de degradación anaerobia, esta etapa tuvo una duración de 38 días (28 de Mayo al 05 de Julio/2012), durante la cual se registraron las mediciones de los parámetros de operación que se encuentran en el ANEXO G.

A esta etapa, Rodríguez (2004), la llama etapa de arranque de un reactor anaerobio, y lo define como periodo de tiempo durante el cual la biomasa anaerobia se adapta en cantidad y calidad a las características del agua residual. Además menciona que la duración de la etapa dependerá del tiempo que se requiera para obtener una calidad constante del efluente y una masa de lodo suficiente, que no varíe cualitativamente con el tiempo. Generalmente se identifica el final del arranque en lo que respecta a la biomasa, con la aparición del fenómeno de granulación y/o formación de un floc o biopelícula estable.

Se han podido definir tres fases en el arranque (Rodríguez, 2004):

1. Adaptación primaria y crecimiento de bacterias degradadoras de los ácidos acético y propiónico.
2. Formación de una biomasa anaerobia metanogénica activa.
3. Formación de un lodo granular, si las condiciones del sustrato lo permiten.

Durante esta etapa no se realizó cargas regulares, con el fin de que no exista una sobre carga de materia orgánica y así evitar que la fermentación ácida predomine sobre la fermentación metanogénica, como lo recomienda Rodríguez (2004).

#### **3.3.4 Carga regular.**

Una vez que se registró la producción mínima de gas, se dio por terminada la etapa de estabilización e inició lo que Rodríguez (2004) define como etapa de operación, este período tuvo una duración de 64 días (06 de Julio a 07 de Septiembre/2012). Durante la etapa de operación, se espera que el reactor funcione en condiciones de estado estable, en el cual las variables de salida del sistema se mantienen relativamente constantes a pesar de las variaciones temporales en cantidad y calidad del afluente como lo recomienda Rodríguez (2004).

En este lapso de tiempo se realizaron cargas y descargas regulares (Figura 3.9 y Figura 3.10) y se monitorearon todos los factores operativos como se observa en el ANEXO G, poniendo especial atención en tres de ellos, que fueron determinantes para el funcionamiento del digester.

- Cargas regulares.
- Valores de pH.
- Evaluación de la temperatura del equipo.
- Medida de la temperatura ambiente.

A continuación Figura 3.9 y Figura 3.10...



**Figura 3.9. Fotografía de carga regular al digestor. Julio 2012. Elaborado por (Autor).**



**Figura 3.10. Fotografía de descarga regular en el digestor. Julio 2012. (Elaborado por (Autor)).**



**Figura 3.11. Fotografía de regulación del pH. Julio 2012. Elaborado por (Autor).**



**Figura 3.12. Fotografía de la construcción de invernadero. Julio 2012. Elaborado por (Autor).**



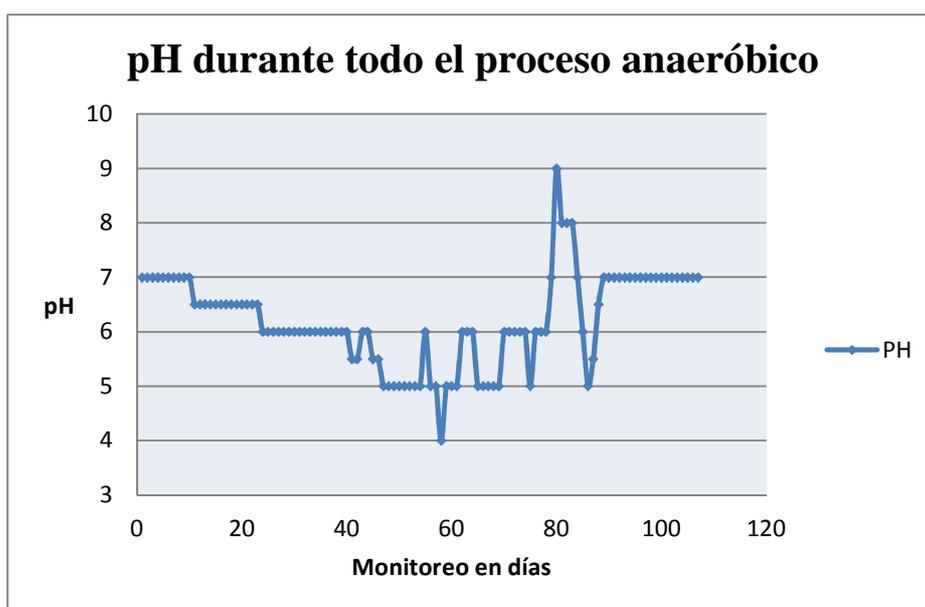
### **3.4 PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.**

#### **3.4.1 Análisis de parámetros operativos.**

##### **3.4.1.1 Monitoreo de pH.**

Durante 107 días que se monitoreo el digestor, se registró un pH promedio de 6,21. Los primeros nueve días se observó que el pH se mantenía en 7, sin embargo a medida que avanzó el proceso anaeróbico el pH bajó, durante la etapa de estabilización no se realizó carga alguna pero si hubo regulación de pH para mantenerlo entre 6,5 y 7 (Figura 3.11). A partir del día 44 superándose la etapa de estabilización, las cargas se hicieron regulares y se pudo observar que el pH continuó bajando, llegando a registrarse en

el día 58 el pH de 4, entonces la regulación se hizo más intensa hasta que se logró subirlo, sin embargo el día 80 se registró un pH de 9, del mismo modo se lo reguló para bajarlo, finalmente a partir del día 89 el pH se mantuvo constante en 7, como se observa en la Figura 3.13.



**Figura 3.13. Evaluación del pH durante todo el proceso anaeróbico.**

Elaborado por: (Autor).

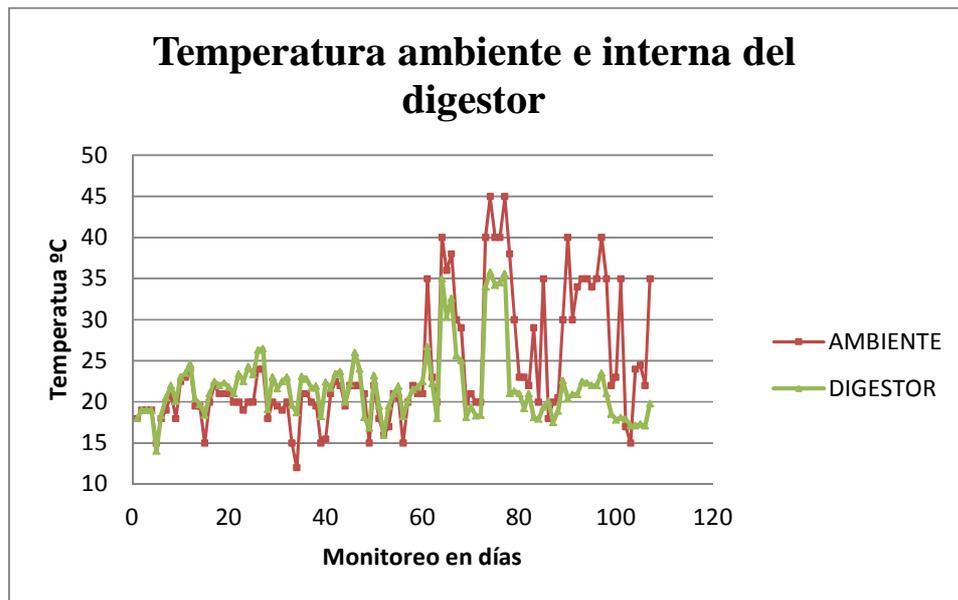
Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0, esto debido a la gran susceptibilidad que presentan los microorganismos metanogénicos frente a las variaciones de pH; manteniendo el valor de 6,21, dentro de los rangos favorables. El descenso del pH luego de que empezaran las cargas regulares se justifica, debido a la excesiva carga orgánica volumétrica que recibió el digestor, que hacía que los ácidos grasos volátiles (AGV) y el CO<sub>2</sub> se acumularan; por ello no se realizó cargas durante la regulación de pH para dar oportunidad a que los AGV se consuman (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011).

### **3.4.1.2 Monitoreo de temperatura.**

La temperatura de operación del equipo fue un punto determinante dentro de este proyecto, pues constituía un desafío al encontrarse la Finca en una zona fría y alta, expuesta a vientos y heladas nocturnas.

Por otra parte, por motivos de presupuesto los primeros 60 días se trabajó sin invernadero, con el tanque forrado con lana de vidrio y plástico, sin embargo al notarse una baja actividad bacteriana y pobre presencia de gas, se optó por poner plástico de invernadero a partir del día 61 (Figura 3.12), manifestándose un cambio en la temperatura que rodeaba al equipo y la estabilización en la temperatura en el interior del digestor.

Con la ayuda de un termómetro ambiental y una termocupla, se midió simultáneamente la temperatura ambiental y la temperatura interna del tanque como se observa en la Figura 3.14. Durante los primeros 61 días se registró en promedio: temperatura ambiente de 19,88 °C, y temperatura del equipo 21,34 °C, en comparación con las temperaturas registradas a partir de la implementación del invernadero hasta la finalización del proyecto, donde se registró una temperatura ambiente promedio de 29,37°C y 22,42°C dentro del digestor. Luego de estos análisis se pudo determinar que el digestor trabajó en un rango psicrófilico, en donde MINERGIA;PNUD;FAO;GEF (2011) determinan que existe un rango de operación mínimo de 4–10 °C, un óptimo de 15-18 °C y un máximo de 20-25 °C.



**Figura 3.14. Monitoreo de temperatura ambiente e interna del digestor anaerobio.**

Elaborado por: (Autor).

Los procesos anaeróbicos al igual que otros procesos biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura, de ahí que MINERGIA;PNUD;FAO;GEF (2011), mencionan que es imprescindible que se la controle, razón por la cual se consideró desde el inicio la importancia de acoplar un aislante térmico al tanque, cuya función fue la de retener todo el calor posible durante las horas de sol. Sin embargo al seguir registrándose temperaturas bajas, se decidió construir un invernadero con plástico amarillo especial para retener radiación infrarroja, con el objetivo de que existiera transferencia neta de calor hacia el líquido contenido en el tanque digestor, y que durante las noches disminuya la pérdida por radiación y convección desde el digestor hacia el ambiente exterior y además que todo el equipo se protega de heladas y granizadas. No obstante Poggio, Ferrer, Batet, & Velo (2006), expresan que el uso del invernadero podría conllevar a oscilaciones térmicas día-noche en la capa superior del líquido del digestor, que en principio serían perjudiciales para la estabilidad del proceso de digestión, pero según Alvarez, Villcaa, & Liden (2006) la actividad metanogénica es suficientemente robusta como para resistir a variaciones cíclicas diarias de temperatura de hasta 14°C, concentrándose la producción de biogás durante las fases de alta temperatura.

### 3.4.1.3 Tiempo de retención.

En la realización de este proyecto el tiempo de retención fue influenciado por la temperatura fría de la zona, puesto que la velocidad del proceso de digestión depende directamente de ella, ya que disminuye la tasa de crecimiento de las bacterias, tal es así que Poggio, Ferrer, Batet, & Velo (2006), determinan que el rango óptimo para una degradación anaerobia es entre 32°C a 38°C, es decir, un rango mesofílico, también menciona que en el caso de la digestión anaerobia psicrófila de estiércol vacuno el proceso se vuelve más lento, obligando a tener tiempos de retención mayores a 100 días como lo precisa MINERGI;PNUD;FAO;GEF (2011), de ahí que se mantuvo en monitoreo el digester durante 107 días. Además, Martí (2008), Bravo & Cosquillo (2011) y Botero & Preston (1987), argumentan que 60 días es el tiempo de retención para zonas frías, sin embargo como se verá más adelante, para este proyecto se hizo necesario 24 días más de lo estimado para generar gas de calidad.

### 3.4.2 Biogás.

La cantidad de gas generado diariamente fue reportada por el desplazamiento del tanque invertido del sistema de recolección de gas.

#### 3.4.2.1 Producción de biogás en función del pH.

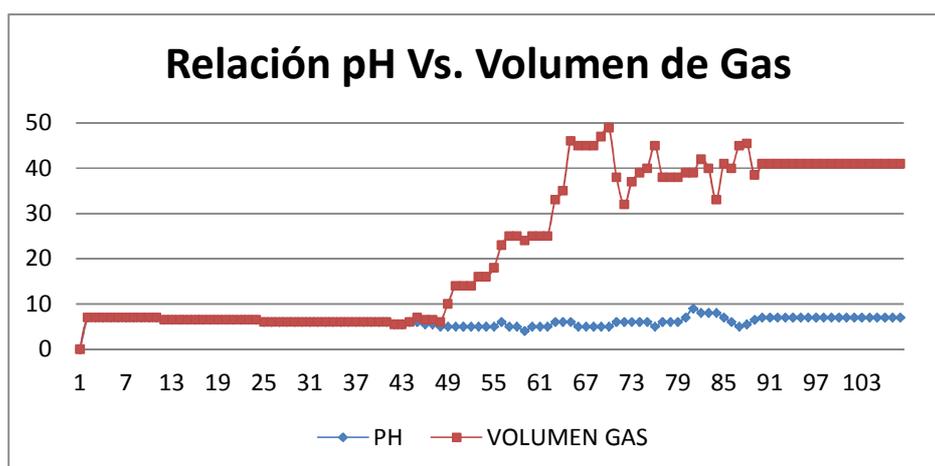


Figura 3.15. Evaluación de la relación pH Vs. Volumen de gas producido.

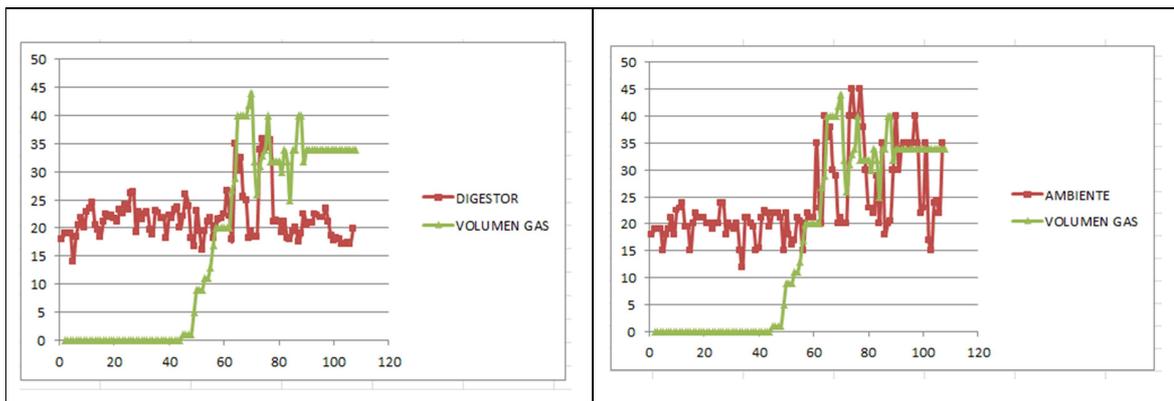
Elaborado por: (Autor).

El pH tuvo un papel importante en la generación de gas metano, si bien es cierto el volumen no se vio afectado, se registraron los niveles más altos de gas en las etapas en que el pH bajó (Figura 3.15), pues el gasómetro llegó a levantarse 40 cm, sin embargo el gas obtenido no se encendía; esto podría explicarse como lo menciona Rodríguez (2004), lo que se estaba generando era una fermentación ácida, es decir, reduciendo la actividad de los microorganismos metanogénicos y por ende provocando más acumulación de ácido acético e Hidrógeno, en este punto las bacterias que degradan el ácido propiónico son severamente inhibidas debido a que aumenta la presión de H<sub>2</sub>, causando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular, lo cual conduce a tener un gas con un alto contenido de dióxido de carbono y bajo contenido de metano (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011); sin embargo a partir del día 89 el pH se mantuvo en 7, generando una producción de gas que también se mantuvo en 34 cm, con la presencia de llama, indicando que la acidificación había sido corregida y lo que se estaba dando era una fermentación metanogénica.

#### **3.4.2.2 Producción de biogás en función de la temperatura.**

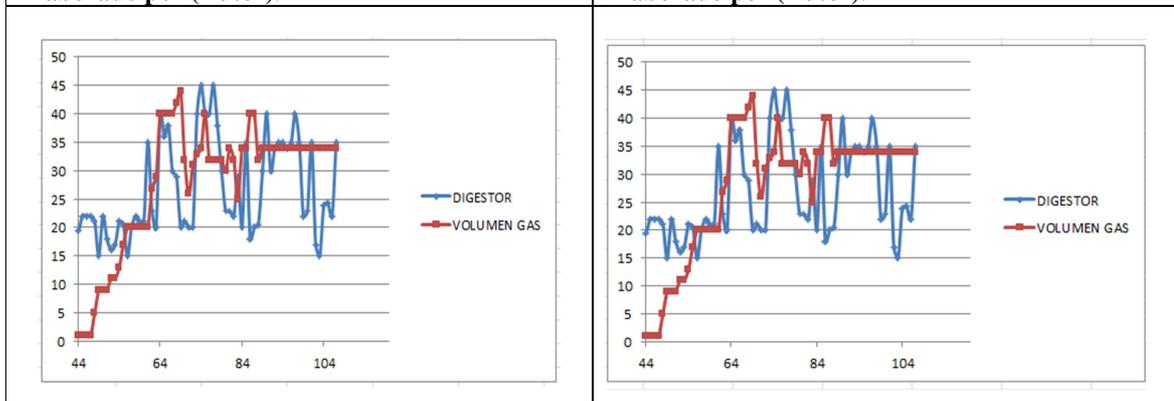
En las Figura 3.16 y Figura 3.17 se observa la relación que hubo entre la temperatura del digestor, la temperatura ambiente y la producción de gas durante los 107 días de operación del sistema, mientras que en la Figura 3.18 y Figura 3.19 se observa la relación de temperaturas digestor y ambiente con el volumen de gas a partir del día 44, donde se registró por primera vez que el tanque de almacenamiento de gas se desplazó un centímetro.

Desde el día 44 al día 61, en donde no se contaba con invernadero se registró en promedio que el tanque se desplazó 11,56 cm, mientras que a partir del día 62 en adelante ya con el invernadero se obtuvo un promedio de 34,20 cm. de elevación.



**Figura 3.16. Producción de gas Vs. Temperatura digestor desde el día 1. Elaborado por (Autor).**

**Figura 3.17. Producción de gas Vs. Temperatura ambiente desde el día 1. Elaborado por (Autor).**



**Figura3.18. Producción de gas Vs. Temperatura digestor desde el día 44. Elaborado por (Autor).**

**Figura 3.19. Producción de gas Vs. Temperatura ambiente desde el día 44. Elaborado por (Autor).**

Según Poggio, Ferrer, Batet, & Velo (2006) la producción específica de metano depende directamente de la temperatura y aunque no existe un modelo para predecir la producción de metano en función de esta, se considera que la producción de biogás se duplica por cada 10°C que aumente la temperatura, lo que justifica porque la producción de gas aumentó drásticamente luego de que se colocó el invernadero, pues la temperatura que rodeaba al digestor dentro del invernadero aumentó de 19,88° a 29,37°C haciendo que por consiguiente se eleve también la temperatura del digestor de 21,34 a 22,42°C.

### 3.4.2.3 Producción de biogás en función del tiempo de retención.

Como se observa en la Figura 3.20, la producción de gas se mostró nula durante los primeros 43 días, la cantidad de gas aumentó progresivamente durante los días posteriores (día 44 al día 54) y fue en ascenso, hasta el día 89 en donde se observa como la cantidad de producción de gas se mantuvo regular hasta la finalización del proyecto, sin embargo entre los días 44 y 88 la cantidad de gas reportada es variable.

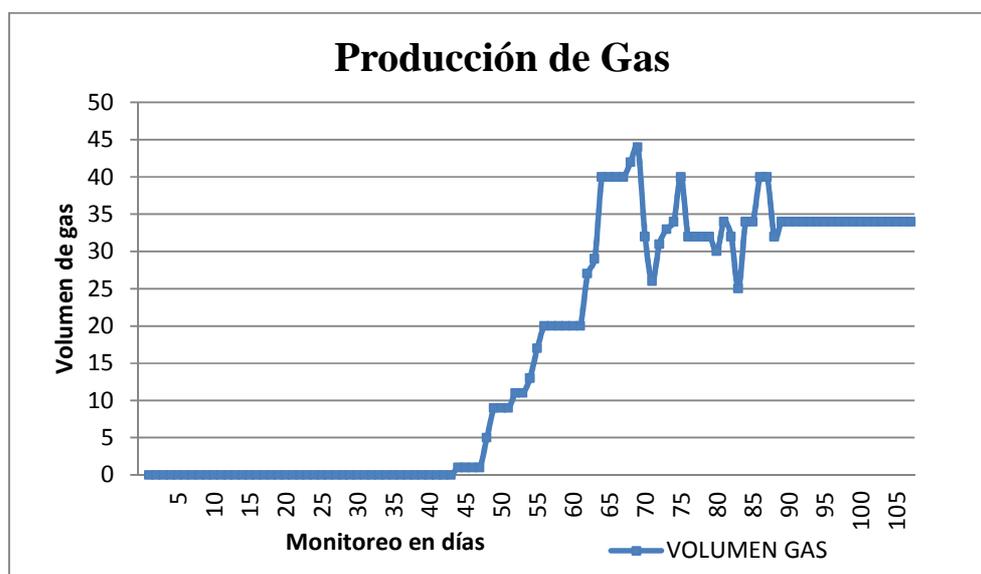


Figura 3.20. Producción de gas durante 107 días.

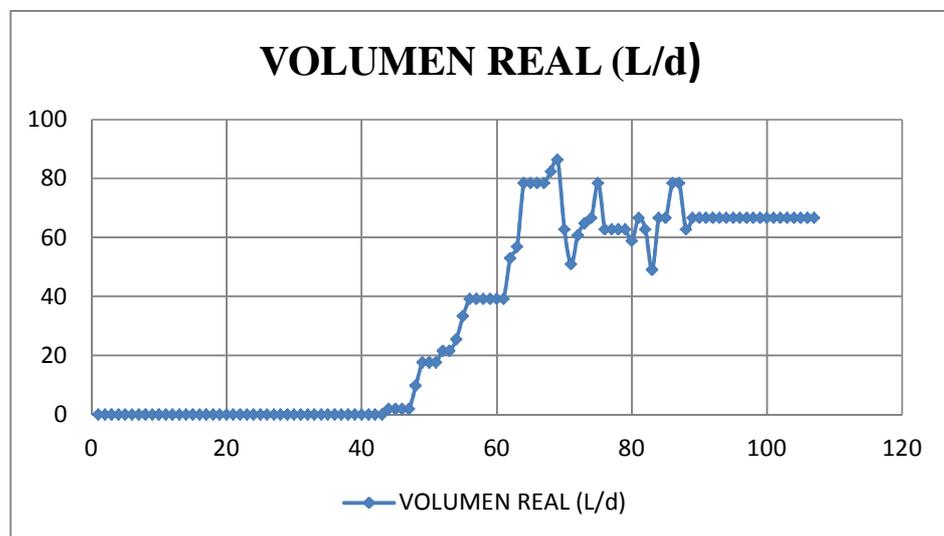
Elaborado por (Autor).

Sogari (2003) menciona en su estudio “Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos” al Dr Shulz quien llevó a cabo experimentos con el fin de contar con mayor información sobre la duración de la digestión, en el cual concluye que la generación de gas describe una curva en función exponencial, a medida que aumenta el tiempo la curva crece hasta un  $t$  determinado para el cual la generación de gas permanece constante, punto en el cual la producción de gas metano ha alcanzado el máximo valor posible; no obstante los datos experimentales obtenidos en este proyecto no permiten obtener la curva característica que se menciona, debido a que durante los primeros días ocurrió probablemente una fermentación acidogénica y no metanogénica lo que hacía que los valores de producción de gas se vean afectados notablemente. Además existió una

variación bastante fuerte de temperatura antes y después de la colocación del invernadero y entre el día y la noche, lo que pudo ocasionar un choque térmico en las bacterias metanogénicas, afectando así su activación; sin embargo al finalizar el proyecto se observa como la producción de gas fue regular llegando al tiempo  $t$  que se menciona dicho estudio.

#### 3.4.2.4 Evaluación del volumen de gas generado.

La Figura 3.21 muestra el volumen de gas en Litros por día, obtenidos durante 107 días de monitoreo donde se registró un promedio de 54,64 L/día o  $0,05\text{m}^3/\text{día}$ .



**Figura 3.21. Volumen de gas L/d durante 107 días.**

Elaborado por (Autor).

El haber obtenido un promedio de  $0,05\text{ m}^3$  de gas al día, confirmó que el sistema operó en condiciones psicrófilicas, coincidiendo así con los resultados de Alvarez, Villca, y Liden (2006) que muestra una producción de  $0,02\text{-}0,04\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3\cdot\text{día}$  como resultado de la digestión de estiércol de vacuno a  $11^\circ\text{C}$  en laboratorio, además cita a Daxiong *et al.* (1990) cuya publicación en “*Revisión del programa Chino de biogás*”, reportan una producción media de biogás de  $0,05\text{-}0,1\text{m}^3/\text{día}$  durante el invierno chino ( $6\text{-}10^\circ\text{C}$ ).

Por consiguiente,  $0,05\text{ m}^3$  de producción de gas se encuentra dentro del rango esperado, debido a las condiciones climáticas como las de la Sierra Andina, donde la

temperatura media anual difícilmente supera los 10°C (Instituto de meteorología e hidrología, 2012). En consecuencia, puede estimarse que la disminución en la cantidad de biogás producida durante los meses fríos es considerable, pudiendo pasar de 1,7m<sup>3</sup>/día durante el verano (26°C) a 0,1m<sup>3</sup>/día durante el invierno (12°C) (Poggio, Ferrer, Batet, & Velo, 2006).

Otra de las razones, por la cual se obtuvo una baja cantidad de gas se podría explicar por los comentarios de Jarauta (2005), quien establece que el estiércol de los rumiantes, particularmente el vacuno es muy útil para iniciar el proceso de fermentación, puesto que este tiene un contenido elevado de bacterias metanogénicas, pero por el contrario, la producción de gas será menor que la obtenida por otro tipo de sustratos por dos factores: en primer lugar, los vacunos extraen mayor parte de nutrientes del forraje y dejan complejos lignosos del forraje más fibroso, que son muy resistentes a la degradación anaerobia, y en segundo lugar, porque realizan una digestión anaerobia parcial y reducen así el potencial de producción de la biomasa.

### 3.4.2.5 Análisis cualitativo de biogás.

Se realizaron ocho mediciones de las cuales se seleccionó las tres mejores, desde la válvula de salida del tanque digestor (posterior al filtro de ácido sulfhídrico), entre los análisis se midió metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno, dióxido de azufre y monóxido de nitrógeno.

Para caracterizar el gas se tomó en cuenta principalmente la concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, puesto que los porcentajes de estos cambian la composición del biogás, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10. Composición de dióxido de carbono y metano en el biogás.**

Muestra	%CO <sub>2</sub>	% CH <sub>4</sub>
1	38,41	> 45%
2	38,38	> 45%
3	38,42	> 45%

Elaborado por (Autor).

El resultado obtenido muestra que en promedio el porcentaje de  $\text{CO}_2$  fue de 38,40% y mayor a 45% de metano, al finalizar el proyecto.

Los porcentajes de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  varían de acuerdo a la bibliografía consultada, así (MINERGIA;PNUD;FAO;GEF, 2011) menciona porcentajes entre, 55-70% de metano y 30-45% de  $\text{CO}_2$ ; por su parte De La Torre (2008) menciona que los componentes del biogás varían en función del sustrato, tal es así que para excretas bovinas el porcentaje de  $\text{CH}_4$  está entre 30-80% y el de  $\text{CO}_2$  entre 30-50%; (Jarauta, 2005) presenta un porcentaje de 40-70% de metano y 30-60% de  $\text{CO}_2$ , colocando a los resultados obtenidos entre los óptimos para ser considerado como gas incoloro e inflamable, como se muestra en la Figura 3.22, el gas fue lo suficientemente inflamable como para encenderse.



**Figura 3.22. Gas metano encendido.**

Elaborado por: (Autor).

### **3.4.3 Biol.**

#### **3.4.3.1 Análisis cualitativo de biol.**

La determinación de las propiedades físico-químicos de la muestra del efluente al final de la operación, fueron realizados por el Centro de Investigaciones y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional y se observan en el ANEXO E.

**Tabla 3.11. Análisis del biol generado durante la digestión anaerobia.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado biol</b>	<b>Dato Referencia</b>	<b>Fuente Bibliográfica</b>
pH	-	7,02	7,3	Ramos citado por (Santamaría, 2006)
Sólidos Totales	mg/L	9262	* <sup>22</sup>	(Santamaría, 2006)
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	733,4	*	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	1354	*	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)
Nitrógeno	%	0,12	0,092	(Santamaría, 2006)
Fósforo	%	0,21	0,31	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)
Carbono	%	0,44	0,47	(Santamaría, 2006)
Coliformes totales	NMP/100L	430	0	(Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008)

Elaborado por (Autor).

Mejía (1996), citado por Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008) señala que las características del sustrato suministrado al digester anaerobio son de gran importancia, ya que los requerimientos nutrimentales de los microorganismos anaerobios son especiales, debido a su lento metabolismo y a que la regeneración de las nuevas células también es muy baja, además Santamaría (2006) menciona que para generar un biol de mayores propiedades se deberá enriquecer el biol con el uso de fitoreguladores, así como de sus precursores, como la adición de alfalfa picada en un 5% del peso total de la biomasa o adicionando vísceras de pescado para un mayor contenido en fósforo, además de agregar sales minerales naturales y realizar un control continuo de C, N, O, N y P .

Es importante considerar que el objetivo de este proyecto era el de generar biogás por lo que no se añadió ningún suplemento, ni sales minerales a la mezcla que ingresaba al digester, sin embargo como se observa en la Tabla 3.11, los resultados obtenidos concuerdan con la bibliografía que trata del biol obtenido de estiércol de ganado vacuno. El

---

<sup>22</sup> \* valores varían de acuerdo al afluente específico que ingresa.

pH se mantuvo neutro, el nitrógeno y el carbono también resultaron muy cerca de lo que Santamaría (2006) menciona, sin embargo, el porcentaje de azufre resultó inferior en relación a lo que menciona Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008). En el caso de los coliformes totales se presentó un número elevado en relación con lo mencionado por Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008), quienes señalan que el valor final fue de cero, esto se puede justificar argumentando que posiblemente faltó tiempo de digestión anaerobia y la temperatura para poder eliminar el remanente de bacterias.

Mientras que en relación con los sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles no existe un parámetro definido, pues depende del afluente que ingresa al digestor, sin embargo, la calidad del efluente obtenido luego de la digestión, varía de acuerdo a la cantidad de sólidos totales contenidos en ésta, ya que estos sólidos son los que sirven de alimento a los microorganismos reponsables de la biodigestión, por ello entre mayor sea la concentración de sólidos totales, mayor contenido de nutrientes habrá en el biol generado (Botero & Preston, 1987).

#### **1.4.3.2 Análisis comparativo del estiércol de ganado y biol.**

Con el objetivo de evaluar el tratamiento e inactivación de los patógenos (coliformes) y la reducción de materia orgánica, DQO, DBO, es decir, la eficiencia a la hora de disminuir los contaminantes generados por las excretas bovinas líquidas de la Finca “Rancho Santa Esther”, se realizó una comparación entre el estiércol de ganado que ingresó como carga inicial y el biol que se generó. A continuación se presenta en la Tabla 3.12 una comparación de estas dos corrientes.

A continuación Tabla 3.12...

**Tabla 3.12. Parámetros en el estiércol y biol del digestor anaerobio.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Estiércol (carga inicial)</b>	<b>Biol</b>
pH	-	6,8	7,02
Sólidos Totales	mg/L	22865	9262
Sólidos Volátiles	mg/L	18615	6384,61
Sólidos Fijos	mg/L	4250	2876,92
Materia orgánica	%	98,12	0,44
Nitrógeno total	%	1,35	0,12
Fosfatos	mg/L	5300	2111
Sulfatos	mg/L	16,0	< 60
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	9638	2773,44
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	8100	1437,7
Coliformes totales	UFC	MNPC <sup>23</sup>	430
Coliformes fecales	UFC	MNPC	200

Elaborado por: (Autor).

**a) pH.**

Entre el estiércol de ganado vacuno lechero y el biol generado, se presentó un pH de 6,8 y 7,02, valores que se encuentran en el rango óptimo (6,6 a 7,6), valores similares reporta Ruiz *et al.*, 2000; Soria *et al.* 2001 Villalobos, 2003; Ramón *et al.*, 2006; todos ellos citados por (Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008).

La neutralidad que presentó el pH indica que el proceso se desarrolló correctamente, esto hizo que exista una eficiencia en la biodigestión, ya que el equilibrio ácido-base es importante para la vida de los microorganismos, además el pH es un criterio

---

<sup>23</sup> Muy numerosas para contar.

importante como indicativo de la disponibilidad de los nutrientes (Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008).

**b) Sólidos totales.**

La importancia de los sólidos totales radica en el aporte de alimento a los microorganismos, es así como la Tabla 3.12 muestra que existió una reducción del 59,49%. Los sólidos volátiles, al ser parte de los sólidos totales, de igual manera presentaron una reducción del 65,7% y los sólidos fijos presentaron una reducción de 32,31%.

**c) Materia orgánica.**

La reducción de materia orgánica fue de un 99,95%, esto debido a que el carbono es transformado en metano y dióxido de carbono (Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008).

**d) Nitrógeno.**

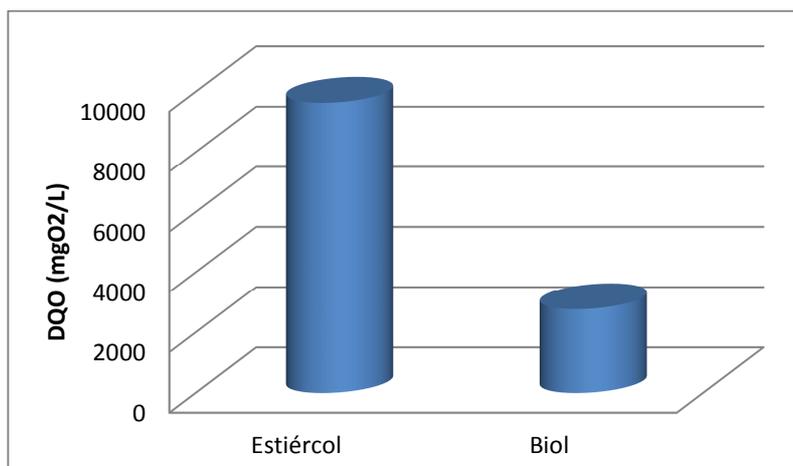
Aunque como como lo describe Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008), la fijación de elementos como el nitrógeno es escaso, hubo una reducción del 91,11%, mucha mayor (62-82%) que el valor mencionado por Gonzáles & Sandoval (2005).

**e) Fósforo.**

De igual manera Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008), señala que la asimilación de los fosfatos es baja, hubo una reducción del 60,17%, sin embargo está dentro del rango que Gonzáles & Sandoval (2005) menciona (50-76%); quedando un remanente que se suministrará al suelo cuando sea utilizado como fertilizante.

**f) DQO.**

La DQO, siendo un indicador de contaminación mide la cantidad de oxígenos necesario para oxidar la materia orgánica degradable, así como también restos de materiales fibrosos, ligninas, entre otros (Estrada, Gómez, & Jaramillo, 2008); disminuyó en 71,20%, como se observa en la Figura 3.23.

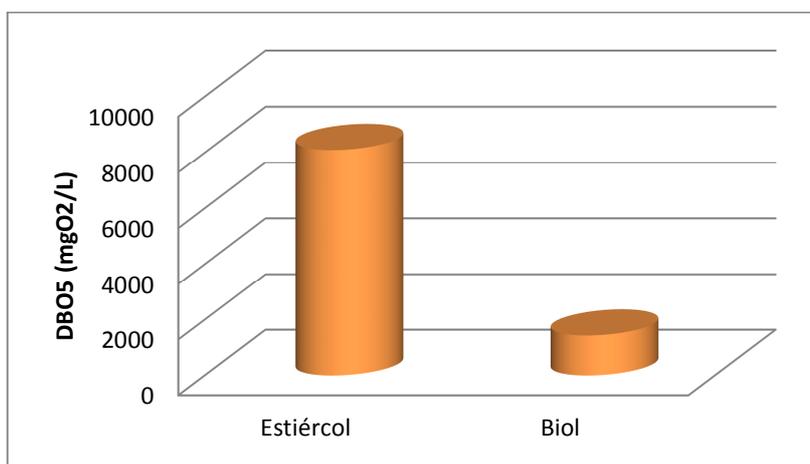


**Figura 3.23. DQO presente en el estiércol y biol.**

Elaborado por: (Autor).

**g) DBO<sub>5</sub>.**

Este parámetro mide el potencial contaminante de las aguas residuales, la reducción fue de 82,25%, como se observa en la Figura 3.24, porcentaje de remoción que se encuentra dentro del rango (70-90%), que según Gonzáles & Sandoval (2005) debe presentarse luego de un digestión anaerobia.



**Figura 3.24. DBO<sub>5</sub> presente en el estiércol y biol.**

Elaborado por: (Autor).

#### **h) Coliformes totales y fecales.**

En lo referente a los coliformes, estos se midieron al inicio, sin embargo como resultado se obtuvo “Muy Numerosas para ser Contadas”, luego de 107 días de retención total se redujeron a 430 UFC de coliformes totales y 200 UFC de coliformes fecales, si bien es cierto no se obtuvo cero UFC como debía ser, la reducción fue grande, lo que indica que hay un alto grado de descontaminación de la excreta, como lo menciona Estrada, Gómez, & Jaramillo (2008), esto se correlaciona con la ausencia de olor desagradable en el efluente.

#### **3.4.3.3 Análisis de eficiencia de la digestión anaerobia.**

Utilizando la Ecuación 2.11 se analizó la eficiencia de los resultados tanto del estiércol como del biol.

$$\text{Porcentaje de eficiencia (DQO)} = \frac{9630 - 2773,44}{9630} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de eficiencia (DQO)} = 71,20\% .$$

$$\text{Porcentaje de eficiencia (DBO}_5) = \frac{8100 - 1437,7}{8100} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de eficiencia (DBO}_5) = 82,25\% .$$

Como resultado se pudo obtener que el sistema sea eficiente, pues en el caso de la DQO logró reducir un 71,20% y en el caso de la DBO<sub>5</sub> hubo una reducción del 82,25%.

### 3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS.

#### 3.5.1 Planteamiento de la hipótesis.

$H_0: E = 50$  (Empleando estiércol bovino líquido como sustrato en un digestor anaerobio continuo, bajo condiciones psicrófilas, se produce 50 Litros de gas metano diarios).

$H_1: E > 50$  (Empleando estiércol bovino líquido como sustrato en un digestor anaerobio continuo, bajo condiciones psicrófilas, se produce más de 50 Litros de gas metano diarios).

#### 3.5.2 Intervalo de confianza para la media.

En el ANEXO F se muestran los datos y cálculos utilizados, para poder realizar el cálculo de los estimadores puntuales.

- Los estimadores puntuales para la media y la desviación estándar son:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{63} X_i}{63} = \mathbf{54,64}.$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{63-1} \sum_{i=1}^{63} (X_i - \bar{X})^2} = \mathbf{22,52}.$$

- Suponiendo distribución normal, el intervalo al 95% de confianza para la  $\mu$  está dado por:

$$Z_{\alpha/2} = Z_{0.025} = \mathbf{1,96}^{24}$$

$$\left[ \bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \right] = \left[ 54,64 - 1,96 \frac{22,52}{\sqrt{63}}, 54,64 + 1,96 \frac{22,52}{\sqrt{63}} \right] = [49,08; 60,20]$$

---

<sup>24</sup> Z: críticos de la distribución normal para  $\alpha = 0,05$  con dos colas 1,96.

Con una confianza del 95% se espera que la producción promedio de gas metano este entre 49,08 y 60,20 Litros.

### 3.5.3 Estadístico de prueba.

Para probar la hipótesis se calculó el estadístico de prueba:

$$Z_0 = \frac{\bar{X} - 50}{s/\sqrt{n}} = \mathbf{1,635}$$

$$Z_{\alpha/2} = Z_{0.025} = \mathbf{1,96}$$

**Z calculado < Z de la tabla**

$$\mathbf{1,63 < 1,96}$$

Por lo tanto se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

*Ho: E = 50* (Empleando estiércol bovino líquido como sustrato en un digestor anaerobio continuo, se produce 50 Litros de gas metano).

Esto se verifica en las tablas mostradas anteriormente, el volumen de gas se encuentra dentro del rango esperado, ya que el sistema operó en condiciones psicrófilas, coincidiendo así con los resultados de Alvarez, Villca, & Liden (2006).

## **CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 CONCLUSIONES.**

- La correcta disposición de excretas bovinas se ha convertido en uno de los factores más limitantes en los procesos de producción animal en ganaderías de leche, por los volúmenes de producción de materia fecal durante el proceso de ordeño en el establo que ocasiona grandes problemas de contaminación ambiental.
- La Finca “Rancho Santa Esther” cuenta con 98 animales de los cuales, 36 son vacas lecheras que ingresan al ordeño dos veces por día, generando en promedio 21,9 kg de excretas; debido a que el ordeño se realiza en un espacio relativamente reducido genera una considerable cantidad de residuos sólidos y líquidos de alto poder contaminante; en donde la construcción de un digestor anaerobio de flujo continuo, se presenta como una solución a esta problemática.
- El análisis de estiércol realizado al inicio mostró una alta humedad, un bajo contenido de sólidos, DBO, DQO, nitrógeno y fósforo dentro de los rangos establecidos por bibliografía, en el caso del carbono estuvo fuera de rango, lo que obligó a realizar una dilución para mantener una C/N apropiada; las UFC's de coliformes totales y fecales se mostraron fuera de rango.
- El haber escogido un tanque digestor de 1000 Litros resultó conveniente para la cantidad de excretas recolectadas. Que el régimen haya sido continuo no fue lo más acertado ya que la gran cantidad de materia orgánica que ingresaba a diario conllevó a tener fermentación ácida.
- El haber utilizado aislante térmico e invernadero fue decisivo para una buena activación de las bacterias anaerobias.

- La excesiva carga orgánica hizo que los ácidos grasos volátiles y el CO<sub>2</sub> se acumularan, creando una fermentación acidogénica, lo que hizo que el pH se mantuviera en promedio 6,21.
- El digestor trabajó la mayor parte del tiempo bajo condiciones psicrófilas, es decir que las bajas temperaturas determinaron la operación del equipo, haciendo lento el proceso de estabilización (38 días) y afectando la generación de gas; el uso de invernadero apresuró el metabolismo bacteriano, sin embargo creó grandes choques térmicos día-noche, mitigados por el aislante térmico.
- Durante 107 días de monitoreo, se obtuvo un promedio de 54,64 L/día o 0,05 m<sup>3</sup>/día de biogás; con un porcentaje mayor al 45% de metano y un promedio de 38,40% de dióxido de carbono.
- El análisis estadístico de datos, confirmó que la producción de gas metano se encontraba dentro de los rangos esperados, produciéndose en promedio 50 Litros/día.
- Diariamente se obtuvo 13 Litros de biol; que comparados con las excretas, presentó un pH que se mantuvo en el rango neutro; una reducción de 59,49% de sólidos totales, 67,7% de sólidos volátiles, 31,31% de sólidos fijos, 99,95% de materia orgánica, 91,11% de nitrógeno, 60,17% de fósforo; finalmente una reducción del 71,20% de DQO y 82,25% de DBO<sub>5</sub>.
- En relación a los coliformes hubo una importante reducción de UFC's, sin embargo no se llegó a cero, por lo que el olor fétido de las excretas también se redujo casi en su totalidad.

## **4.2 RECOMENDACIONES.**

- Implementar un sistema de calentamiento de excretas que no consuma gas, para disminuir tiempos de retención.
- Planificar de una mejor manera la recolección de excretas, a fin de que no se desperdicie y con ello ser capaces de generar mayor cantidad de gas.
- Estudiar más a fondo digestores que trabajen a temperaturas bajas, con el objetivo mejorar el diseño de sistemas anaerobios.
- Realizar un estudio reológico del sustrato para diseñar un sistema de agitación y mejorar la eficiencia en la producción de gas.
- Medir las propiedades nutricionales de los abonos orgánicos que se producen en el digestor y probar alternativas de post-tratamiento.

## CAPITULO V. FUENTES DE INFORMACIÓN

### 5.1 BIBLIOGRAFÍA.

- Acosta, N. (2011). *Diseño, Construcción Y Operación de un Digestor Anaerobio Piloto Para Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos del ZOOLOGICO DE QUITO*. ESPE. Ecuador.
- Alvarez, R., Villca, S., & Liden, G. (2006). *Biogas production from llama and cow manure at high altitude, Biomass and Bioenergy*. Barcelona.
- Bavera, G., & Peñafort, C. (2006). *Lectura de la bosta del bovino y su relación con la alimentación*. Argentina.
- Bermudez, J., Canovas, M., Manjon, A., Iborra, J., & Howel, J. (1988). *Digestión Anaerobia*. Murcia: Secretariado de Publicaciones.
- Bernal, J. (Junio de 2005). *Manual del manejo de pastos cultivados para zonas alto andinas*. Perú.
- Borrego, S. (Diciembre de 2008). *Estadística decriptiva e inferencial*. Granada. España.
- Botero, R., & Preston, T. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la produccion de combustible y fertilizantes a partir de excretas*. Cali. Colombia.
- Bravo, W., & Cosquillo, R. (Febrero de 2011). *Cálculo, diseño y construccion de un biodigestor*. Unidad Académica Ciencias de la Ingeniería. Ecuador.
- Canul, M. (Agosto de 2010). *Estudio de los parámetros de operación de un reactor anaerobio para la producción de hidrógeno a partir de residuos orgánicos*. Universidad Estatal de Arizona. Arizona. USA.
- Carballas, L. (1999). *Bioles* . Capitulo 2. Quito. Ecuador.

- CEDECAP-GREEN EMPOWERMENT. (Mayo de 2009). *Taller de intercambio de experiencias de biodigestores en América Latina*. Lima. Perú.
- Corporación para la Investigación Energética. (2011). *Corporación para la Investigación Energética/Bioenergía*. Ecuador.
- De La Torre, N. (Octubre de 2008). *Digestión anaerobia en comunidades rurales*. Universidad Carlos III de Madrid. España.
- Demanet, R. (2007). *Manual de especies forrajeras y manejo de pastos*. Universidad de Temuco. Chile.
- Domínguez, D., Granja, J., Guachagmira, R., & Robalino, L. (Agosto de 2010). *Manual de Operación de un Biodigestor tipo Hindú y flujo continuo*. Universidad Técnica del Norte. Imbabura. Ecuador.
- Estrada, M. (2005). Manejo y procesamiento de gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación*, 43-48. Antioquia. Colombia.
- Estrada, J., Gómez, G., & Jaramillo, A. (Septiembre de 2005). *Efecto del biodigestor plástico de flujo continuo en el tratamiento de aguas residuales de establos de bovinos* Universidad de Caldas. Manizales. Colombia.
- FAO. (1992). *Biogas processes for sustainable development Agricultural Services Bulletin No 95*. Roma.
- Ganadero. (Julio de 2007). *Tablas referencia composición de estiércoles y purines*. Navarra. España.
- García, A. (Abril de 2000). *Calidad alimentaria de la mezcla de cerdo y esquilmos agrícolas deshidratada al sol para bovinos de engorde*. Universidad de Colima. México.
- García, M. (2003). *Estimación por intervalos de confianza para la media*. Universidad de Cantabria. España.

- Gonzáles, Y., & Sandoval, S. (2005). *Diseño de Sistemas de Tratamiento y Aprovechamiento de Purines de Origen Bovino*. Universidad Católica de Temuco.
- Hilbert, J. (13 de Agosto de 2003). *Manual para la Producción de Biogás*. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A.-Castelar.
- Jarauta, L. (31 de Enero de 2005). *Digestión Anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos-El Casco Perú*.
- Leningher, A. (1992). *Principio de bioquímica. Metabolismo-y-Crecimiento-Bacteriano*. Capítulo 4. Traducción España.
- López, A. (Noviembre de 2011). *Obtención de biofertilizante a partir de un residuo ultrafino SPIRULINA PLATENSIS, mediante degradación anaerobia en fase hidrolítica*. ESPE. Ecuador.
- López, A. (2009). *Valoración del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás*. Asociación colombiana de porcicultores. Colombia.
- López, G. (1992). *Digestión anaerobia de residuos orgánicos urbanos*. Universidad Distrital FJC. Colombia
- Martí, J. (2008). *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*. GTZ Proagro. Bolivia.
- Martí, N. (2006). *Estudio del proceso de digestión anaerobia para optimizar la recuperación de fósforo en EDAR'S*. Boca Ratón. Florida. USA.
- McCaskey, A. T. (1990). Microbiological and chemical pollution potencial of swime waste. *Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo CINVESTAV* , 12-32. Guadalajara. México.

- Mendoza, C., & López, O. (2009). *Diseño y construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para le laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas del a Universidad Veracruzana.*México.
- Metcalf, & Eddy. (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse.* McGraw - Hill. USA.
- MINERGIA;PNUD;FAO;GEF. (2011). *Manual de biogas.* Segunda comunicación nacional de Chile sobre el cambio climático. Chile.
- Moncayo, G. (2009). *Aprovechamiento de estiércoles, desechos orgánicos y reciduos para la producción de biogás, energía eléctrica y fertilizante orgánico.* Fundación Fiagro. El Salvador.
- Ochoa, I. (Diciembre de 2009). *Tipos de compost.* Universidad Autónoma de Madrid. España.
- Pérez, J. (Marzo de 2010). *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en ganaderos y lecheros.* Universidad de Chile. Chile.
- Poggio, D., Ferrer, I., Batet, L., & Velo, E. (2006). *Adaptation of plastic tubular biodigesters to cold climates.* Instituto para una Alternativa Agraria – IAA. Cusco. Perú.
- Ramírez, I. (2010). *Emisiones de metano generadas por excretas de animales de granja y contenido rumial de bovino.* Institución de enseñanza e investigación en ciencia agrícolas. Texcoco. México.
- Red Latinoamericana de Energías Alternas. (2008). *Elaboración, uso y manejo de abonos orgánicos para la producción agrícola.* Quito. Ecuador.
- Robalino, H. (Septiembre de 2008). *Estudio comparativo y aplicación de materia prima alternativa en biodigestores unifamiliares de flujo continuo en la Zona de Intag.Cotacachi-Imbabura.* Universidad Técnica del Norte. Ecuador.

- Rodríguez, J. (28 de Enero de 2004). *Arranque y operación de reactores anaerobios*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- Sánchez, S. (Junio de 2003). *Energías Renovables-Conceptos y aplicaciones*. WWF-Fundación Natura. Quito. Ecuador.
- Santamaría, D. (05 de Marzo de 2006). *Evaluación microbiana, hormonal y nutricional de ocho formulaciones en la preparación de biol y su aplicación en tres dosis en el cultivo de palmito*. ESPE. Ecuador.
- Sierra, C., & Rojas, C. (2010). *La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos*. Centro Nacional de Investigación La Platina. Chile.
- Sogari, N. (2003). *Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos*. Facultad de Cs. Exáctas y Naturales y Agrimensura UNNE. Corriente. Argentina.
- Sosa, R., Chao, R., Cruz, E., & Diana, M. (5 de Mayo de 2007). *Boletín técnico porcino/biodigestores*. Instituto de investigaciones porcinas. Punta Brava. Cuba.
- Torres, L. (Enero de 2009). *Estudio de la prefactibilidad para la implementación de la producción y comercialización de leche cruda en la finca "La Floresta"*. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador.

## 5.2 WEBGRAFÍA.

- Agroecuador. (2011). *Población vacuna en el Ecuador*. Recuperado el 16 de Febrero de 2012, de [http://www.agroecuador.com/HTML/Censo/censo\\_3111.htm](http://www.agroecuador.com/HTML/Censo/censo_3111.htm)
- Fundación Brethren Unida. (2011). *Fundación Brethren Unida*. Recuperado el 08 de Octubre de 2011 de [http://www.fbu.com.ec/spanish/otras\\_iniciativas\\_desarrollo.htm](http://www.fbu.com.ec/spanish/otras_iniciativas_desarrollo.htm)

- INEC. (2002). *Censo Nacional Agropecuario* . Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de <http://www.inec.gob.ec>
- Instituto de metereología e hidrología. (Marzo de 2012). *Pronostico del tiempo- Instituto de metereología e hidrología*. Recuperado el 11 de Marzo de 2012, de <http://www.inamhi.gov.ec/html/inicio.htm>
- Instituto para una alternativa agraria. (2007). *Manual de un biodigestor familiar tipo manga para zonas altas-andinas*. Recuperado el 07 de Marzo de 2012, de [http://grecdh.upc.edu/publicaciones/manuals-tecnics/documents/m01\\_guia-de-instalacion-para-yachachiq.pdf](http://grecdh.upc.edu/publicaciones/manuals-tecnics/documents/m01_guia-de-instalacion-para-yachachiq.pdf)
- Isover. (2012). *Isover-Lana de vidrio-*. Recuperado el 25 de Abril de 2012, de <http://www.isover.com.ar/lana/acerca.html>
- MAGAP. (12 de Agosto de 2012). *Censo de ganado areteado*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de <http://www.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio del Ambiente . (Septiembre de 2004). *Ley Forestal y de Conservación de Areas Naturales y Vida Silvestre*. Recuperado 09 de Octubre de 2011 de Ley de la Prevención y Control de la Contaminación: <http://www.ambiente.gob.ec/>
- TecnoTech Teconología para construcción. (2008). TecnöLiner 500. Recuperado 09 de Octubre de 2011 de <http://www.innovasem.com/tag.aspx?id=d5279158-a6a8-4697-8537-216577c3485b>