

# **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

### 1. ANTECEDENTES.

La tecnología de los biodigestores se basa en la degradación de la materia orgánica realizada por bacterias anaerobias. Se utiliza con diferentes fines como el tratamiento de residuos agrícolas, ganaderos, de mataderos, domésticos, pozos sépticos y desechos de alcantarillas, para obtener fertilizante natural o combustible (Quipuzco Ushñahua, Baldeón Quispe, & Tang Cruz, 2011).

Países como Alemania, China e India, hasta la actualidad son los que han desarrollado más esta tecnología; es así que encontramos diferentes modelos de biodigestores propios de cada país. Cada modelo de biodigestor responde a ciertos criterios como: tipo de materia orgánica a digerir, cantidad, clima del lugar donde se instalará, entre otros (Hilbert, 2011).

En Bolivia esta tecnología no es muy difundida, pero existen proyectos en ejecución a cargo instituciones como la Cooperación Alemana (GIZ, GTZ), la fundación Hivos, el CIMNE (UMSA) y otros por iniciarse; los mismos se centran en los biodigestores familiares de bajo costo. La mayoría de los biodigestores instalados en el país son de este tipo (Martí Herrero, 2008).

En el departamento de Tarija existen zonas aptas para la crianza de animales de diferente tipo, como el ganado bovino, porcino y las aves de corral, que son destinados a diferentes usos: lechero, cárnico (granjas de pollos, chanchos) o para labrar la tierra.

La crianza de animales genera focos de contaminación si no hay un sistema de tratamiento de sus desechos, ya que la cantidad de heces vertidas por los animales es importante y más aún cuando se trata de gran número de animales.

El primer y único biodigestor de polietileno tubular instalado en el valle central de Tarija se encuentra ubicado en la Provincia José María Avilés, comunidad Barrientos, en la finca Huayrihuana, que está a cargo de la empresa agrícola del mismo nombre.

Por lo que se hace necesario un estudio propio que respalde esta tecnología, de manera que se adecúe a las necesidades y requerimientos de otras fincas para su implementación.

La finca Huayrihuana tiene una extensión de terreno de 50 ha aproximadamente. En la finca se realizan diversas actividades agrícolas entre las que destaca el cultivo de la vid y debido a la cantidad de abonos que requiere su cultivo, se optó por la incursión en la utilización de abonos orgánicos que puedan producirse en la misma finca, aprovechando la materia prima disponible: estiércol bovino, y constituirse en una empresa agrícola pionera que utilice de manera integral los recursos disponibles en la finca.

Es así que se realizó la instalación de un biodigestor de polietileno tubular (mayo, 2014), que de acuerdo a la última visita realizada a la finca Huayrihuana (Julio, 2016) sigue en funcionamiento.

Para la instalación del biodigestor de la empresa Huayrihuana se realizó un taller práctico denominado “Construcción de biodigestores, producción de energía y abono orgánico a partir de residuos” en fechas 13, 14 y 15 de mayo de 2014, que fue posible gracias al trabajo conjunto de la RASP, fundación Hivos, la empresa Huayrihuana y la UAJMS. La instalación del biodigestor y el taller estuvieron a cargo de Martí, J. quien trabaja en proyectos de biodigestores en Bolivia desde el 2002. Asistieron al taller e instalación del biodigestor productores agrícolas, estudiantes y docentes de la UAJMS.

## **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL.**

Operar y rediseñar un biodigestor de polietileno tubular experimental.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Realizar el seguimiento a la operación del biodigestor.
- Determinar las condiciones de operación del biodigestor.
- Determinar las características de la materia prima para el biodigestor.
- Determinar la cantidad y características del producto biol obtenido del biodigestor.
- Determinar la eficiencia de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, Coliformes Fecales CF, Sólidos Totales y Sólidos Volátiles.
- Determinar la cinética y variables del proceso de descomposición de la materia orgánica en el biodigestor.
- Rediseñar el biodigestor experimental.

## **3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.**

### **3.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.**

La operación de un biodigestor experimental permite determinar la cantidad y calidad de biol producido para que pueda ser dosificado y aplicado en el área agrícola.

El conocimiento de la cinética y variables del proceso de descomposición de la materia orgánica permite determinar las mejores condiciones de operación de un biodigestor de polietileno tubular para la obtención de biogás, abono y biol.

El desarrollo del presente proyecto permitirá además determinar si los productos obtenidos pueden ser manejados por las personas, y en caso de que se requiera de un tratamiento posterior para la reducción de agentes patógenos, proponer una solución.

### **3.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.**

Los biodigestores contribuyen a mejorar las explotaciones agropecuarias; las granjas agrícolas que poseen ganado podrían producir su propio abono orgánico requerido, con lo que disminuirían la adquisición de abono y productos químicos, realizando un uso complementario de ambos abonos y el biogás que puede ser utilizado como combustible para la cocina, facilitándose además el control de la contaminación y añadiendo valor agregado a la excreta del ganado. Esto en sí mismo es una ganancia ya que a partir de un desecho, el estiércol, se está obteniendo un combustible de uso directo, el biogás, y un producto cuya aplicación presupone una mejora en los rendimientos agrícolas.

La utilización del abono orgánico que se produciría, por su contenido de nutrientes, aumentaría la calidad de los cultivos y por ende su valor económico.

### **3.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL.**

El funcionamiento de un biodigestor, que funcione en óptimas condiciones, desaparece o minimiza malos olores, contaminación, parásitos, propagación de pestes, generación de vectores, etc. agentes que pueden ser causa de enfermedades en las personas; a la par que reduce los montos para la adquisición de abonos químicos, los mismos que pueden ser empleados para mejorar la propia economía y calidad de vida.

Con la utilización de biogás, producido en un biodigestor, se elimina el problema de intoxicación de personas que cocinan con leña, estiércol seco u otros combustibles generadores de humos y gases tóxicos. Se dispone de una fuente de energía económica y de fácil obtención (para cocina, iluminación, refrigeración) y se reduce el trabajo de recolección de leña o el costo de GLP (Guevara Vera, 1996; Preston, 2005; Hilbert 2011).

Es por ello que el seguimiento y la operación de un biodigestor experimental es necesario para conocer si la reducción de los agentes contaminantes y patógenos es suficiente para que los productos obtenidos sean manejados por seres humanos. De

manera que esta tecnología pueda, con mayor seguridad y respaldo, instalarse en otras fincas.

#### **3.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL.**

El impacto ambiental de la actividad ganadera (bovino y/o porcino) se reduce al contar con un sistema de tratamiento del estiércol producido por el ganado, disminuyendo malos olores, contaminación del cauce del río, polvo con estiércol, etc. Pues las descargas contaminantes que están siendo vertidas en la actualidad y dañan los cursos de agua y el aire, se reducirían para dar paso al uso de los productos que se obtienen del tratamiento del estiércol en un biodigestor como abonos orgánicos y biogás.

Se evita el uso de la leña en zonas rurales, peligros de deforestación y la pérdida de biodiversidad en la zona disminuyendo el deterioro del medio ambiente.

En tal sentido, la caracterización de los productos que se obtienen de un biodigestor mostrará en qué proporción esta tecnología reduce los agentes contaminantes del estiércol

**CAPÍTULO I**  
**MARCO TEÓRICO.**

## CAPÍTULO I

### I. MARCO TEÓRICO.

#### I.1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

La descomposición de la materia orgánica es un proceso de fermentación, donde moléculas orgánicas complejas se transforman en moléculas más sencillas. El proceso de digestión puede ocurrir de forma anaerobia o aerobia.

- La fermentación anaerobia: es la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno por medio de bacterias, produciendo principalmente metano, dióxido de carbono, agua y un resto de diversos componentes.
- La fermentación aerobia: consiste la descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno por medio de bacterias, produciendo principalmente dióxido de carbono, agua y un resto de diversos componentes.

La fermentación anaerobia es conocida generalmente como “Digestión Anaerobia” o “Biodigestión Anaerobia”.

La digestión anaerobia entonces, es un proceso en el que la materia orgánica es transformada en ausencia de oxígeno por la acción de bacterias anaerobias obteniéndose un producto gaseoso rico en metano (biogás) y un líquido digerido (biol, biosol) que pueden ser utilizados como fertilizantes por tener menor carga orgánica y agentes patógenos que el sustrato inicial.

Este proceso se realiza en recipientes o cámaras cerradas denominadas biodigestores ya que la digestión anaerobia es un proceso biológico similar al que ocurre en el aparato digestivo de los seres vivos.

El sustrato que se utiliza para el proceso es cualquier material orgánico, que generalmente son desechos de otra actividad, entre los que destacan estiércol de ganado, residuos agrícolas, domésticos, heces humanas, restos de mataderos entre otros.



El proceso de digestión anaerobia ha sido conocido desde la antigüedad, pero era comprendido en función de sus productos finales y no sus procesos, (Taylhardat, 1989). El siguiente cuadro muestra la evolución del proceso de digestión anaerobia a lo largo de los años:

**Cuadro ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1**  
Avances en el Proceso de Biodigestión Anaerobia.

<b>Año</b>	<b>País</b>	<b>Autor/es</b>	<b>Avance</b>
1884		Louis Pasteur, Gayón	Fermentación de estiércoles: fuente de energía, Medina (1984)
1896	Inglaterra	Donald Camerón	Perfeccionó tanque séptico y utilizó el gas (energía).
1896	EE.UU.	Dr. Louis P. Kinnicutt.	Investigación.
1900	Bombay – India	Charles James	Utilizó el gas para un motor.
1923	Alemania		Distribución de biogás mediante red pública para satisfacer demanda de energía.
1927	Inglaterra		Impulsa uso de biogás. Introduce sistema para recolectar gas por medio de estructuras flotantes de concreto, (Herrera, 1977)
1939	India		Unidad experimental para el estudio y diseño de sistemas que requiere utilización de biogás.
En India y la República Popular China se ha difundido esta tecnología en forma masiva en el sector campesino, existiendo más de 7.5 millones de digestores construidos y operando. (Taylhardat, 1986).			
En los últimos años se ha demostrado la potencialidad de la biodigestión anaerobia para el tratamiento de los residuos y excretas de origen doméstico y agropecuario.			
Países como China, India, Australia, Inglaterra, etc., utilizan el proceso como una técnica aliada en la lucha contra la contaminación ambiental, especialmente en el área rural en donde los efluentes urbanos y agropecuarios son transformados en sustancias inofensivas al ecosistema circundante, mejorando la calidad de vida de sus habitantes, (FAO, 1986).			
1980	Inglaterra	Hobson, P. et al.	Utilizando la Digestión Anaerobia lograron grandes reducciones en los niveles de DBO y DQO de efluentes urbanos y agropecuarios; sustancias aromáticas como el fenol y lindol fueron removidos. Summer R y Bous field obtuvieron resultados iguales.
1986	Cali, Colombia	Seminario taller sobre biogás y otras fuentes	Se están desarrollando experiencias en Colombia, Perú, Bolivia, Costa Rica, Honduras.

Año	País	Autor/es	Avance
		alternas de energía en el medio rural (14-17 de octubre).	La FAO está dando un apoyo decidido. Algunos países industrializados como la República Federal de Alemania, concibió el programa especial de energías renovables (PEER)
El PEER es un proyecto que debería fomentar la investigación sobre el uso de energéticos renovables, entre ellos la tecnología del biogás, teniendo como objetivo la reducción de cargas contaminantes y la sustitución de abonos químicos mediante el uso de los efluentes tratados y de buena calidad fertilizante.			
1986	Venezuela	Organismos oficiales como CADAFE, el I.V.I.C. y la U.C.V.	Investigación incipiente. Organismos oficiales como CADAFE, el I.V.I.C. y la U.C.V., aúnan esfuerzos y recursos para realizar investigaciones tendientes a un mejor conocimiento de la técnica del Biogás, así como una mayor difusión técnica para lograr su implementación popular y rápida.

Fuente: Fundamentos para el Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales. 1996.

## I.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA.

La materia prima o sustrato utilizado en el proceso de digestión anaerobia es cualquier material orgánico sujeto a descomposición procedente de un proceso biológico que puede aprovecharse como fuente de energía (biomasa).

Entre las materias primas más comunes en el proceso de digestión anaerobia están los desechos domésticos como cáscaras de frutas y vegetales, agrícolas como pasto, paja, hierbas, agropecuarios como heces de animales, efluentes urbanos y agrícolas; y plantaciones energéticas como maíz, soya, arroz entre otros.

Esta biomasa puede convertirse en energía a través de dos procesos, el bioquímico, en el cual se ubica la tecnología del biogás, y el termoquímico (Posso, 2002).

La biomasa se clasifica de acuerdo con las siguientes categorías (Posso, 2002).

- **Natural**, que corresponde a la que se produce espontáneamente en la naturaleza, como bosques, matorrales, hierbazales, entre otros.

- **Residual**, obtenida de las actividades industriales, domésticas y actividades agrícolas, ganaderas y forestales, como los estiércoles que son usados como materia prima para la producción del biogás, residuos urbanos.
- **De plantaciones energéticas**, que corresponde a cultivos energéticos, es decir plantaciones que están dedicadas a la producción de un combustible, como la caña de azúcar, el maíz, especies de palma, entre otros (FAO, 2008).

Por un lado, los procesos termoquímicos como la combustión, la pirolisis o la gasificación se aplican a la biomasa seca debido a que es más fácil aprovechar su energía mediante este proceso.

Mientras que los procesos bioquímicos de transformación se aplican para la biomasa húmeda, aunque ya se están aplicando procesos bioquímicos a biomasa seca. Los procesos termoquímicos pueden tener más interés energético que ecológico ya que los diferentes residuos son agentes contaminantes (Zorg Biogás, 2007).

Una de las formas de aprovechar la biomasa es a través del proceso de digestión anaerobia, el cual es estudiado en el presente trabajo. En este proceso la compleja materia orgánica se transforma en metano y otros gases; su producción depende de la cantidad y del tipo de materia prima y de las condiciones de operación. Se ha podido establecer que usando materia altamente biodegradable se obtiene 0,5 m<sup>3</sup> de gas por Kg de masa, con un 70 % de Metano (Guzmán, 2008).

A continuación, se muestra diferentes materias primas o sustratos empleados en el proceso de digestión anaerobia y su porcentaje de grasas, celulosa, proteína y lignina:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-1 Análisis de Diversos Sustratos

<b>Materiales</b>	<b>Renglones %</b>	<b>Grasas</b>	<b>Lignina</b>	<b>Celulosa Compleja</b>	<b>Proteína</b>
Estiércol Porcino	Frescos %	3.15	5.8	8.88	3.0
	Totales %	11.5	21.49	32.39	10.95
	VS %	15.03	28.08	42.32	14.31
Estiércol Vacuno	Frescos %	0.65	7.11	6.56	1.81
	Totales %	3.23	35.57	32.49	9.05
	VS %	4.20	46.2	42.26	11.77

<b>Materiales</b>	<b>Renglones %</b>	<b>Grasas</b>	<b>Lignina</b>	<b>Celulosa Compleja</b>	<b>Proteína</b>
Estiércol de aves	Frescos %	2.96	13.66	24.83	6.36
	Totales %	2.84	19.82	50.55	9.56
	VS %	3.46	24.11	61.5	11.58
Paja de Arroz	Frescos %	8.54	11.28	53.25	4.81
	Totales %	9.62	12.7	59.95	5.42
	VS %	11.18	14.76	69.19	6.3
Pasto Verde	Frescos %	1.28	1.56	9.1	0.79
	Totales %	8.05	9.8	57.22	4.94
	VS %	9.90	17.05	70.36	6.07

Fuente: Instituto Industrial de Microbiología de Shanghai. (Extraído de El Biogás). 1986.

La Tabla I-2 muestra las características de los estiércoles que son residuos agrícolas y es la materia prima más utilizada en el proceso de digestión anaerobia:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2**

Características de los Estiércoles

<b>Características de los estiércoles [Botero &amp; Preston 1986; Vargas 1992].</b>		
<b>Datos básicos</b>	<b>Ganado</b>	
	<b>Porcino</b>	<b>Vacuno</b>
Cantidad de estiércol fresco/24 horas en porcentaje de peso vivo (PV)	3%	6%
Porcentaje de sólidos volátiles (SV) en estiércol fresco	20%	16%
Cantidad de estiércol por 500 kg de PV	15 kg	30 kg
Cantidad de sólidos volátiles por 500 kg de PV	3 kg	4,8 kg
Producción de biogás por 100 kg de PV	0,25 m <sup>3</sup>	0,21 m <sup>3</sup>
Producción de Biogás por kg de SV	0,42 m <sup>3</sup>	0,22 m <sup>3</sup>

Fuente: Botero & Preston (1986); Vargas (1992); Ramón et al. (2006).

En la siguiente tabla se indican las características de otros materiales orgánicos de origen animal que pueden emplearse como sustrato para la obtención de biogás y abono orgánico.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3**

Características de otros sustratos de origen animal, utilizados para carga en biodigestores.

Origen	Cantidad diaria		% material de fermentación		Litros de biogás por un kg de sólidos orgánicos
	Estiércol en % del peso vivo	Orina en % del peso vivo	% sólidos totales	% Sólidos orgánicos	
Caprinos y ovinos	3	1,5	30	20	200
Equinos	5	4,0	25	15	250
Avícola	4,5	4,5	25	17	400

Fuente: Álvarez et al., sf; Torres & Follari, sf; Vargas (1992).

Los residuos vegetales (Álvarez et al., sf, 1992), como paja, pasto y desechos de verdura, pueden fermentarse anaeróbicamente debiendo previamente triturarse para evitar la formación de capa flotante y dar un tratamiento especial en plantas donde se hace una sola carga hasta que el material se descompone (Vargas, 1992; Ramón et al., 2006).

Algunos de estos sustratos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4** Residuos vegetales y posible producción de biogás.

Material fresco	% Sólidos totales	% Sólidos volátiles	Litros de biogás por un kg de sólidos orgánicos
Paja de arroz	89	93	220
Paja de trigo	82	94	250
Paja de maíz	80	91	410
Hierba fresca	24	89	410
Jacinto de agua	7	75	325
Bagazo de caña de azúcar	65	78	160
Desecho de verdura	12	86	350

Fuente: Álvarez et al., sf.

### **I.3. EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

El proceso de Digestión Anaerobia es un proceso microbiológico donde la fermentación de la materia orgánica se realiza en ausencia de oxígeno e implica una serie de reacciones bioquímicas en las que participan una gran variedad de microorganismos (bacterias); que por un lado oxidan completamente parte del carbono formando dióxido de carbono y por otro lo reducen para formar metano (Guevara, A., 1986).

La materia orgánica (biomasa) para el proceso está compuesta principalmente de polisacáridos, proteínas y grasas; éstos son desdoblados por bacterias algunas producen metano, dióxido de carbono y otras no producen ningún gas, también se ha encontrado la presencia de protozoarios y hongos.

La degradación y transformación de la materia orgánica es producto del trabajo e interacción del conjunto de estos microorganismos (que producen o no metano) por lo que la base para el diseño de equipos, procesos de biodigestión, tecnologías y control de las variables operacionales, es el conocimiento de la microbiología de la digestión anaerobia.

En el proceso participan una amplia variedad de bacterias de tipo tanto facultativas como anaerobias estrictas. Se han establecido dos etapas sucesivas en el proceso anaerobio conocidas como fases no metanogénica y metanogénica.

En la fase no metanogénica participan las bacterias anaerobias facultativas y estrictas, y en la fase metanogénica participan las bacterias anaerobias estrictas.

Se conocen cuatro grupos de bacterias que tiene acción catabólica sobre el carbono de la materia orgánica de acuerdo a Zeikus (1986) nombrado por Guevara, A. (1986), como se indica a continuación:

**Grupo 1. Bacterias hidrolíticas**, catabolizan sacáridos, proteínas, lípidos y otros constituyentes menores de la materia orgánica.

**Grupo 2. Bacterias acetogénicas**, producen hidrógeno, catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros.

**Grupo 3. Bacterias Homoacetogénicas**, catabolizan compuestos monocarbonados e hidrolizan compuestos multicarbonados hacia la producción de ácido acético.

**Grupo 4. Bacterias metanogénicas**, catabolizan acetato, compuestos monocarbonados para producir metano. Se distinguen cuatro géneros: metanobacterium, methanococcus, methanospirillum y methanosarcina.

Los tres primeros grupos de bacterias participan en la primera fase no metanogénica y el cuarto grupo en la fase metanogénica. Los grupos de bacterias mencionados son clasificados de acuerdo su actividad metabólica y dan lugar a las etapas consideradas en el proceso de digestión anaerobio: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Mejía Sánchez, 1996).

#### **I.4. MICROORGANISMOS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

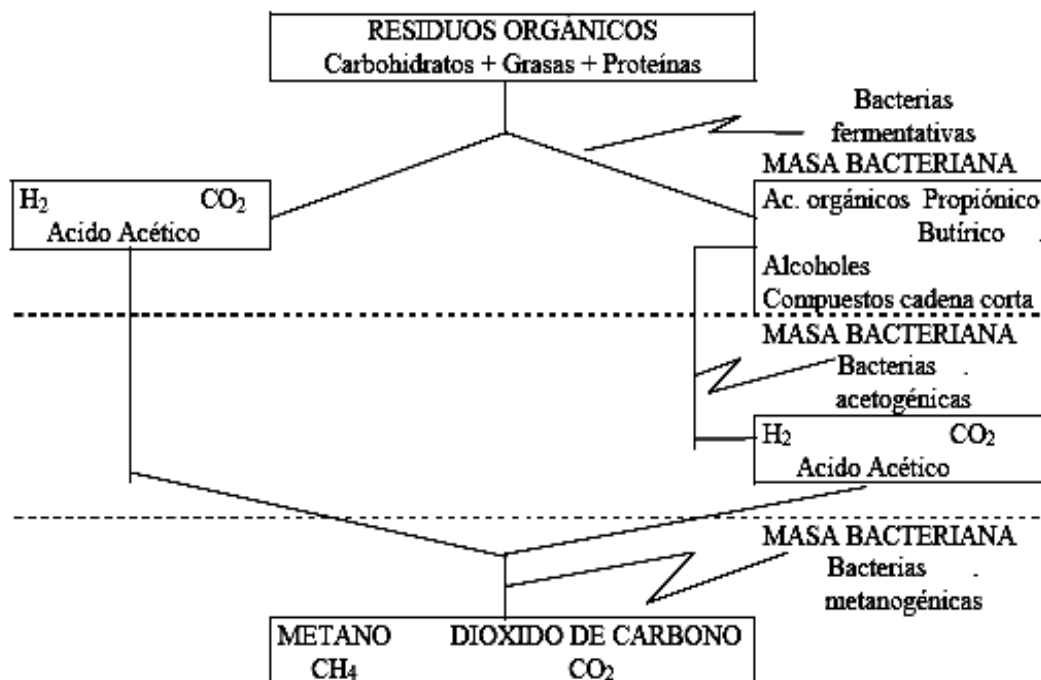
El proceso de digestión anaerobia es un proceso biológico que requiere de todo un conjunto de bacterias que participan en cada una de las etapas del proceso. Como se ha indicado anteriormente se distinguen dos fases en todo el proceso, estas son: fase no metanogénica y metanogénica, en la primera actúan los microorganismos que no producen metano y en la segunda los microorganismos que producen metano.

En la primera fase las moléculas que conforman la materia orgánica se transforman en compuestos más simples que sirven de sustrato para los microorganismos que se desarrollan en la segunda fase, caracterizada por la producción de metano (Mejía Sánchez, 1996).

Las dos fases fundamentales del proceso anaerobio están constituidas por varios procesos de acuerdo al tipo de microorganismo que en ellos participan y se clasifican según la actividad metabólica de estas bacterias.

Un resumen de la degradación anaerobia de la materia orgánica se muestra en la figura siguiente.

Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1  
Degradación anaerobia de la materia orgánica.



Fuente: Digestión anaerobia. (Mejía Sánchez, 1996).

#### **I.4.1. FASE NO METANOGÉNICA - MICROORGANISMOS QUE NO PRODUCEN METANO.**

Los microorganismos que no producen metano se desarrollan en la fase no metanogénica, estos microorganismos son bacterias anaerobias facultativas y estrictas; se ocupan de convertir complejas moléculas orgánicas en compuestos más sencillos (catabolizan) de ácidos grasos de cadena corta, que sirven de sustrato en la siguiente fase metanogénica (Guevara Vera, 1996).

En esta primera fase se realizan tres tipos de reacciones sucesivas: hidrólisis de polisacáridos, lípidos y proteínas. Posteriormente los productos de esa transformación



se fermentan para formar ácidos grasos, produciéndose dióxido de carbono en pequeñas cantidades.

Los ácidos volátiles que se forman en esta fase son metabolizados por bacterias metanogénicas en la siguiente fase dando como producto la mezcla de gases que se conoce como biogás (Mejía Sánchez, 1996).

Se ha establecido que hay tres tipos de bacterias, clasificadas según sus requerimientos tróficos: bacterias hidrolíticas, acidogénicas y acetogénicas.

Las **bacterias hidrolíticas** solubilizan extracelularmente las moléculas de los polímeros orgánicos de carbohidratos, proteínas y lípidos; formando azúcares, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos.

Las **bacterias acidogénicas** utilizan los productos metabólicos de la fase anterior, los cuales son fermentados intracelularmente produciendo los ácidos grasos de cadena corta conocidos como ácidos volátiles, siendo los más importantes de éstos: el acético, propiónico y butírico seguidos del valérico y caproico; aunque también se forma en cantidades muy pequeñas ácido fórmico. En esta parte del proceso también se produce hidrógeno y dióxido de carbono, y la misma actividad bacteriana produce sulfuros y algunos compuestos aromáticos que provienen de los aminoácidos que conforman las moléculas de las proteínas.

Las **bacterias acetogénicas**, que transforman a los ácidos grasos, producidos en la fase anterior, en ácido acético; este ácido servirá de sustrato para las bacterias metanogénicas. En esta etapa de la digestión anaerobia se produce también dióxido de carbono e hidrógeno, productos que son igualmente sustrato para algunas bacterias metanogénicas.

Las bacterias presentes en la fase no metanogénica de la digestión anaerobia pertenecen a diferentes grupos fisiológicos de microorganismos, entre los que se han aislado especies con actividad celulítica, lipolítica y proteolítica, así como de bacterias denitrificantes y productoras de sulfuro; dentro de la gran variedad de

bacterias no metanogénicas se han encontrado especies esporuladas y no esporuladas y bacilos–Gram negativos.

Las bacterias no metanogénicas se encuentran en mayor proporción en relación a las bacterias metanogénicas. Estos microorganismos pueden clasificarse en bacterias (los más importantes), mohos y protozoos:

**1. Bacterias:** Sobre la base de sus grupos fisiológicos:

- Las que descomponen celulosa
- Las que descomponen la hemi-celulosa
- Las que descomponen proteínas
- Las que descomponen grasas
- Las que producen hidrógeno
- Microorganismos no específicos como Thiovibros
- Las que emplean ácido láctico.

**2. Mohos:** mediante cultivo artificial se llegó a la conclusión de los mohos y levaduras encontradas en la digestión anaerobia participan en el proceso obteniendo los nutrientes para reproducirse.

**3. Protozoos:** Se ha encontrado que estos microorganismos también formarían parte del proceso, especialmente Plasmodium, flagelados y amebas siendo menor su importancia (Guevara Vera, 1996).

En la tabla siguiente, se encuentran las bacterias comúnmente encontradas en la fase no metanogénica.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-5 Bacterias comúnmente encontradas en la fase no metanogénica.

Género	Especie bacteriana
Aerobacter	A. aerogene
Alicaligenes	A. brookerii
	A. faecalis
	A. viscolactis
Bacillus	B. cereus

<b>Género</b>	<b>Especie bacteriana</b>
	B. cereus var. Mycoides
	B. circulans
	B. endorhythmos
	B. firmus
	B. knefelkampii
	B. megaterium
	B. pantothenicus
	B. punilis
	B. sphaericus
	B. subtilis
Clostridium	C. aminovalericum
	C. carnofoetidum
Echerichia	E. coli
	E. intermedia
Leptospira	L. biflexa
Micrococcus	M. candidus
	M. varians
	M. ureae
Neiseria	N. catarrhalis
Paracolobactrum	P. intermedium
	P. coliforme
Proteus	P. vulgaris
Pseudomonas	P. aeruginosa
	P. ambigua
	P. denitrificans
	P. olaovorans
	P. perolens
	P. pseudomallei
	P. reptilivora
	P. riboflavina
Rhodopseudomonas	R. palustris
Sarcina	S. cooksonii
	S. lutea
Serratia	S. indicans
Streptococcus	S. diploidus
Streptomyces	S. bikiniensis

Fuente: Digestión anaerobia. (Mejía Sánchez, 1996).

#### **I.4.2. FASE METANOGÉNICA - MICROORGANISMOS QUE PRODUCEN METANO.**

Los microorganismos que producen metano son bacterias anaerobias estrictas, que requieren para su desarrollo potenciales REDOX muy bajos (-300mv), son muy susceptibles al oxígeno molecular y al pH y son inhibidas por los ácidos volátiles no ionizados, usan como sustrato compuestos simples.

Su crecimiento y reproducción es lento, duplicar su número tarda de 4 a 6 días. Debido a la dificultad de aislar, incubar y almacenarlos se han obtenido pocas especies (cepas) puras, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-6**

Clasificación de las Metano bacterias.

<b>Orden</b>	<b>Familia</b>	<b>Género</b>	<b>Especies</b>
Methanobacteriates	Methanobacteriaceae	Methanobacterium	Methanoformicum Methanobryantil M. thermoautotrophic Methanoruminantium Methanoarboriphilus Methanosmithil
Methanococccates	Methanococcaceae	Methanocoecus	Methanovannieli Methanovoltae
Methanomicrobiates	Methanomicrobiaceae	Methanogenium	Methanocaraci Methanomarispigri
		Methanospieillum	Methanohongatei
	Methanomicrobium	Methanomobile	
	Methamisarcinaceae	Methanosarcina	Methanobarkerie

Fuente: FAO (Biogás una experiencia en China. 1986.

#### **I.5. ETAPAS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

Un gran número de microorganismos trabajan en serie o en serie-paralelo en la digestión anaerobia degradando la materia orgánica en sucesivas etapas.

En la práctica ingenieril se acostumbra a considerar tres etapas para residuos sólidos o lodos (hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y metanogénesis); el enfoque más novedoso lo constituye el de las cuatro etapas o niveles tróficos hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, (Jewell, W 1987).

Considerando la acción de estos microorganismos, el proceso de digestión anaerobia se puede describir en tres etapas Citerio y Herrera (1977):

- 1. Hidrólisis:** Hidrólisis y fermentación, periodo de producción intensiva de ácidos. Se inicia con las grasas (compuestos de más fácil descomposición), gran producción de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , ácidos orgánicos, bicarbonatos y acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}$ ). El pH es ácido en esta etapa variando de 5,1 a 6,8.
- 2. Acetogénesis:** Deshidrogenación acetogénica, periodo de digestión de ácidos y compuestos nitrosos. Se producen pequeñas cantidades de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$ ; bicarbonatos, compuestos amoniacales,  $\text{SH}_2$  y acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}$ ). Gran parte de los sólidos flotan y el pH está entre 6,6 y 6,8.
- 3. Metanogénesis:** Descarboxilación del acetato y formación de metano por reducción, periodo de digestión intensiva. Se produce Metano ( $\text{CH}_4$ ), Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), amoniaco ( $\text{NH}_3$ ), sales de ácidos orgánicos y nitrógeno. Pequeña cantidad de los sólidos flotan y el pH se hace básico de 6,9 a 7,4.

Considerando las cuatro etapas del proceso, se tiene lo siguiente:

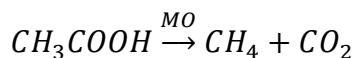
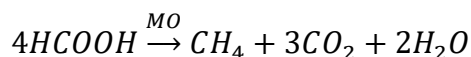
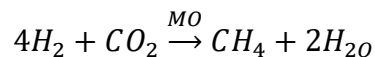
- 1. Hidrólisis:** En esta etapa, los substratos complejos (celulosa, proteína, lípidos) son hidrolizados en compuestos solubles (azúcares, aminoácidos y grasas) por la acción de enzimas extracelulares de las bacterias.
- 2. Acidogénesis:** En esta etapa, los compuestos solubles son fermentados a ácidos grasos volátiles (acético, prociónido, butírico), alcoholes hidrógeno y  $\text{CO}_2$ . Esta etapa se conoce también como fermentativa. Es decir, es un periodo de producción intensiva de ácidos, que se inicia con los alimentos y compuestos de más fácil descomposición, como las grasas, donde hay una alta producción de dióxido de

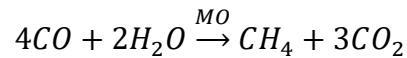
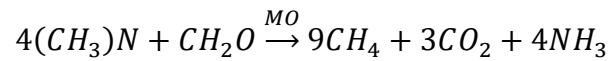
carbono (CO<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), ácidos orgánicos y bicarbonatos; su pH se encuentra en la zona ácida, con valores entre 5,1 y 6,8 (Guevara Vera, 1996).

**3. Acetanogénesis:** Esta etapa ocurre cuando las bacterias acetogénicas oxidan el ácido propiónico y el butírico hasta acético e hidrógeno, que son los verdaderos sustratos metanogénicos. Es decir, es un periodo donde se producen ataques a los ácidos orgánicos y compuestos nitrosos, en pequeñas cantidades hay producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrógeno e hidrógeno, bicarbonatos y de compuestos amoniacales. Se caracteriza por presentar mal olor debido a la presencia de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), flotación de gran parte de sus sólidos, y un pH aún en la zona ácida con valores entre 6,6 y 6,8 (Guevara Vera, 1996).

**4. Metanogénesis:** En esta etapa, los últimos compuestos son tomados dentro de las células bacteriales metanogénicas convirtiéndolos en metano y excretándolo fuera de la célula. Este es un periodo de digestión intensiva, de carácter de fermentación alcalina, en el cual hay una digestión de las materias resistentes, de las proteínas, de los aminoácidos, y de la celulosa. Se caracteriza por la producción de sales de ácidos orgánicos y volúmenes de gas, en una mezcla donde hay un alto porcentaje de metano, y el resto corresponde a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y nitrógeno (Guevara Vera, 1996). Como características del material digerido, están el olor a alquitrán, hay pequeñas cantidades de sólidos flotantes, y el pH se ubica en la zona alcalina, con valores entre 6.9 y 7.4 (Guevara Vera, 1996).

Las bacterias metanogénicas sólo pueden usar un número limitado de sustratos para la formación de metano, éstos son CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, acetato, metanol, metilamina, y monóxido de carbono; las reacciones de conversión más usuales en la producción de energía que involucran estos compuestos son (Márquez, 2005):





Fuente: Fundamentos para el diseño de biodigestores. Oyala y González (2009).

## **I.6. FACTORES QUE INFLUYEN Y CONDICIONES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

El Proceso de Digestión Anaerobia, al ser un proceso microbiológico, necesita condiciones ambientales propicias para que el sistema anaerobio funcione eficientemente, desde el momento en que el sustrato entra al biodigestor hasta la producción del gas y salida del efluente.

A continuación, se describen los principales factores que influyen en la descomposición de la materia orgánica durante el proceso de digestión y las condiciones recomendables del proceso.

### **I.6.1. MATERIA ORGÁNICA O SUSTRATO DE ALIMENTACIÓN PARA EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

Los microorganismos que participan del proceso requieren de nutrientes, por lo que es necesario que la alimentación al proceso sea la necesaria para el proceso y no se interrumpa. La materia orgánica para el proceso puede dividirse en dos grupos: ricas en carbono y ricas en nitrógeno; que se utilizan como fuente de energía y otras como constituyente celular respectivamente (Guevara Vera, 1996).

### I.6.2. RELACIÓN CARBONO-NITRÓGENO (C/N).

Estos elementos se consumen en determinada proporción en el proceso. Las heces humanas y animales tienen una relación típica de 25:1, entonces mejor velocidad de degradación y generación de gas, mientras que los residuos agrícolas una relación de 30:1 por tanto generación más lenta de gas.

A continuación, se indica la relación C/N de diferentes sustratos:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-7** Relación C/N de sustratos que se utilizan para el proceso.

<b>Materias Primas</b>	<b>Contenido de Carbono de las materias primas por peso (%)</b>	<b>Contenido de Nitrógeno de las materias primas por peso (%)</b>	<b>Relación Carbono a Nitrógeno (C/N)</b>
Paja seca de Trigo	46	0,53	87:1
Paja Seca de Arroz	42	0.64	67:1
Tallo del Maíz	40	0.75	53:1
Hojas Secas	41	1.00	41:1
Estiércol de Aves	41	1.30	32:1
Pasto	14	0.54	27:1
Cacahuets Tallos y Hojas	11	0.59	19:1
Estiércol Fresco de Oveja	16	0.55	29:1
Estiércol Fresco de Vaca	7.3	0.29	25:1
Estiércol Fresco de Caballo	10	0.42	24:1
Estiércol Fresco de Cerdo	7.8	0.60	13:1
Excretas Frescas Humanas	2.5	0.85	2.9:1
Estiércol de Aves			15:1

Fuente: Fundamentos Básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. 1996.

La experiencia reconoce que una relación de 20-30:1 es aceptable para el proceso.



### I.6.3. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES EN LA ALIMENTACIÓN.

En general se recomienda una concentración de sólidos totales del 5-10 % (Guevara Vera, 1996), esto varía de acuerdo al tipo de biodigestor por ejemplo en biodigestores de laguna cubierta se recomienda no más de 3 % (Roos, Martin, & Moser, 2004).

La composición de sólidos totales ST y sólidos volátiles SV de sustratos típicos para el proceso se muestra a continuación:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-8 Análisis ST y SV de Diversos Sustratos.

<b>Materiales</b>	<b>Reglones %</b>	<b>Sólidos Totales (TS)</b>	<b>Sólidos Volátiles (VS)</b>
Estiércol Porcino	Frescos %	27.4	20.97
	Totales %	100	76.54
	VS %	-----	100
Estiércol Vacuno	Frescos %	20.0	15.8
	Totales %	100	76.89
	VS %	-----	100
Estiércol de aves	Frescos %	68.9	56.64
	Totales %	100	82.20
	VS %	-----	100
Paja de Arroz	Frescos %	88.82	76.41
	Totales %	100	86.02
	VS %	-----	100
Pasto Verde	Frescos %	15.9	12.93
	Totales %	100	81.32
	VS %	----	100

Fuente: Instituto Industrial de Microbiología de Shanghái. (Extraído de El Biogás). 1986.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9**  
 Contenido de sólidos totales de diferentes sustratos utilizados en zonas rurales.

<b>Materiales</b>	<b>Contenido Seco (%)</b>	<b>Contenido Hídrico (%)</b>
Paja de Arroz	83	17
Paja de Trigo Seca	82	18
Tallo de Maíz	80	20
Pasto Verde	24	76
Excretas Humanas	20	80
Estiércol de Cerdo	18	82
Estiércol de Vaca	17	83
Orina Humana	0.4	99.6
Orina de Cerdo	0.4	99.6
Orina de Vaca	0.6	99.4

Fuente: El Biogás (Tayhaldart, 1986).

#### **I.6.4. LA TEMPERATURA.**

La temperatura es directamente proporcional a la velocidad de degradación de la materia orgánica e inversamente proporcional al tiempo de retención, con lo que la producción de gas y de reducción de agentes patógenos se ve favorecida por la temperatura (Tayhaldart, 1986).

El siguiente cuadro muestra la relación que existe entre la temperatura y la producción de gas en biodigestores rurales pequeños:

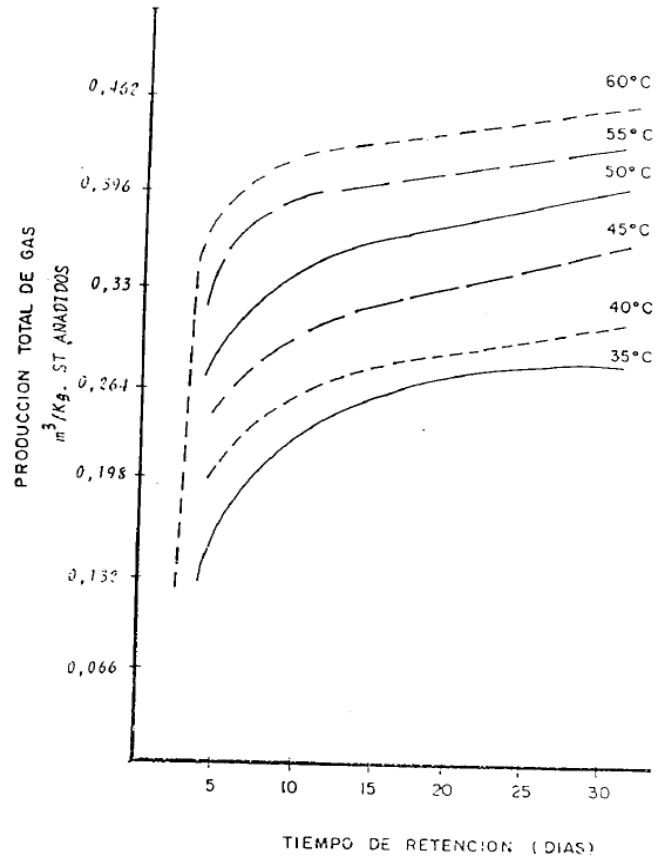
Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-10**

Rendimiento de gas a distintas temperaturas.

<b>Material de Carga</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Producción de Gas (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> x día)</b>
Paja de Arroz + Estiércol	29-30	0.55
Porcino + Pastos	24-26	0.21
Porcino + Pastos	16-20	0.10
Porcino + Pastos	12-15	0.07
Porcino + Pastos	Menos de 8	Escasa

Fuente: Fundamentos Básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. 1996.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-2 Efecto de la temperatura y tiempo de retención sobre la producción de gas.



Fuente: Golueke (1977), citado por Moreno, J.g (1988).

Como se observa en la figura anterior, para un mismo tiempo de retención la producción de biogás aumenta con la temperatura. Para conseguir una misma producción de gas el tiempo de retención se hace mayor conforme disminuye la temperatura (Moreno, 1988).

### I.6.5. VALOR DEL pH.

Se encuentra que el pH óptimo para la fase metanogénica es de 6,5 a 7,5; con valores menores a 5 o mayores a 8 el proceso puede detenerse. Cuando el sustrato es a base

de residuos domésticos o ganaderos, el mismo proceso varía el pH a valores óptimos. Pero cuando se acidifica el proceso se puede corregir agregando cenizas, agua amoniacal (para subir el pH).

#### **I.6.6. PROMOTORES E INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

Los promotores, sales inorgánicas, enzimas, úrea,  $\text{CaCO}_3$ , son aquellos que aumentan la velocidad de la degradación de la materia orgánica y producción de gas; mientras que los inhibidores, elevada concentración de ácidos volátiles,  $\text{NH}_3$  y  $\text{N}_2$ , son aquellos que impiden la actividad vital de los microorganismos.

Son muchos los factores que pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia, la siguiente tabla muestra algunos de ellos y su concentración inhibidora:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11**

Concentración inhibidora de inhibidores comunes.

<b>Inhibidores</b>	<b>Concentración Inhibidora</b>
$\text{SO}_2$	5000 ppm.
$\text{NaCl}$	40000 ppm.
Nitrato (Según contenido de Nitrógeno)	0.05 mg/ml
$\text{Cu}$	100 mg/ml
$\text{Cr}$	200 mg/l
$\text{Ni}$	200-500 mg/ml
$\text{CN}$	25 mg/ml
Detergente Sintético	20-40 mg/ml
$\text{Na}$	3500-5500 mg/ml
$\text{K}$	2500-4500 mg/ml
$\text{Ca}$	2500-4500 mg/ml

Fuente: FAO. 1986.

#### **I.6.7. LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.**

La Demanda Bioquímica de Oxígeno  $\text{DBO}_5$  de un líquido se define como la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias aerobias o anaerobias facultativas: *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*, hongos y plancton,

consumen o necesitan durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se expresa en unidades de mg/l.

Como el proceso de descomposición varía según la temperatura, este análisis se realiza en forma estándar durante cinco días a 20 °C; esto se indica como DBO<sub>5</sub>.

La demanda bioquímica de oxígeno da una idea de la cantidad de microorganismos presentes, pues a mayor cantidad de materia orgánica contenida en la muestra, más oxígeno necesitan sus microorganismos para oxidarla (degradarla).

#### **I.6.8. LA CANTIDAD DE COLIFORMES FECALES.**

Los Coliformes Fecales es un grupo de los coliformes totales, está constituido por bacterias Gram-negativas capaces de fermentar la lactosa con producción de gas a las 48 h de incubación a  $44.5 \pm 0.1$  °C. Este grupo no incluye una especie determinada, sin embargo, la más prominente es el *Escherichia coli*.

El *Escherichia coli* es un bacilo corto Gram-negativo que se encuentra clasificado dentro de la familia Enterobacteriaceae (bacterias entéricas), existe como comensal en el intestino delgado de humanos y animales. Sin embargo, existen algunas cepas de *E. coli* patógenas que provocan enfermedades diarreicas.

Es por eso que se utiliza para medir el grado de contaminación de una muestra, en el caso de digestión anaerobia con una materia prima que es estiércol vacuno, este parámetro interesa para verificar la reducción de contaminación a través de este indicador.

Los valores de coliformes fecales determinados en aguas residuales se expresan en NMP/100ml y se utiliza el método de tubos múltiples.

#### **I.7. CLASIFICACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

El Proceso de Digestión Anaerobia requiere de un manejo adecuado para que funcione eficientemente, desde que se carga el biodigestor hasta la producción del gas y salida del efluente.

Existen varios procesos para el tratamiento de diversos sustratos, cada uno depende de las condiciones del diseño del sistema, del biodigestor y del modo de carga de los sustratos a ser fermentados. Es así que el proceso de digestión anaerobia puede clasificarse de acuerdo a tres criterios:

#### **I.7.1. POR LA FORMA DE LA ALIMENTACIÓN.**

Según la forma de alimentación el proceso de digestión anaerobia puede ser:

- **Continua:** Alimentación ininterrumpida.
- **Semicontinua:** La primera carga que se introduce, consta de gran cantidad de materiales; cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento del gas se agregan nuevas materias primas y se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad.
- **Por lotes:** Se alimenta una sola vez y se descarga todo luego del tiempo de retención definido (Guevara Vera, 1996).

#### **I.7.2. POR LA TEMPERATURA.**

De acuerdo a la temperatura el proceso puede ser:

- **Fermentación termofílica:** Temperatura de 51 a 55 °C.
- **Fermentación mesofílica:** Temperatura de 28 a 35 °C.
- **Fermentación a temperatura ambiente:** Varía de una estación a otra dependiendo del lugar.

#### **I.7.3. POR EL NÚMERO DE ETAPAS.**

Por el número de etapas el proceso de digestión anaerobia se clasifica en dos:

- **Fermentación en una sola etapa:** el proceso se realiza en un solo recipiente.
- **Fermentación en dos o más etapas:** el proceso se realiza en dos o más recipientes de fermentación.

## I.8. PRODUCTOS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

### I.8.1. BIOGÁS.

El biogás es una mezcla de múltiples componentes, donde predomina el metano y se encuentra una variada cantidad de otros como ser: CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SH<sub>2</sub>, etc. en distintas proporciones y otros componentes en trazas.

Tiene una composición promedio de 60 % de metano (CH<sub>4</sub>) y 40 % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

A continuación, se presenta una tabla donde se muestran la composición y otras propiedades del biogás:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-12**  
Propiedades del Biogás.

<b>Composición</b>	<b>55 – 70 % metano 30 – 45 % dióxido de carbono Trazas de otros gases</b>
Contenido energético	6,0 – 6,5 kWh/m <sup>3</sup>
Equivalente de Combustible	0,60 – 0,65 l petróleo/m <sup>3</sup> biogás
Límite de Explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 750 °C (con el contenido de metano mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura Crítica	-82,5 °C
Densidad normal	1,2 kg/m <sup>3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)

Fuente: FAO. 2012.

El biogás puede ser usado no sólo como combustible, sino también para la generación de energía eléctrica cuando las cantidades de biogás obtenidas son importantes.

Entre las cualidades que posee el biogás la empresa ZORG BIOGAS, empresa que presta servicios de Ingeniería y Construcción de Plantas de Biogás desde 2007, indica las siguientes:

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-13

## Cualidades principales del Biogás.

Energía envuelta en 1 m <sup>3</sup> de biogás	6-6,5 kWh
Capacidad Valor Calorífico	4500-5600 kcal/m <sup>3</sup>
Densidad biogás	1,16-1,27 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de combustión	650-750 °C
Presión dentro de un reactor de biogás	0,05 atm

Fuente: ZORG BIOGÁS. 2012.

De esta manera por las cualidades que posee el biogás, la tecnología de los biodigestores constituye una forma adecuada para el tratamiento de residuos orgánicos y es amigable con el medio ambiente porque permite acceder a un combustible económico, obtener un abono natural que aporta con nutrientes al suelo mejorando las cosechas, o aprovecharlo generando energía eléctrica cuando se trata grandes cantidades de residuos (Viquez Arias, 2010).

Siendo una buena opción para el tratamiento de residuos en áreas rurales donde no se cuenta con servicio de gas natural para acceder a combustible; que tienen problemas de contaminación por los residuos que genera la actividad agrícola para tratar los residuos producidos, o que requieren de un abono natural para mejorar las tierras y cosechas agrícolas.

### 1.8.2. BIOL.

El biol es el efluente del biodigestor que sale después de un tiempo igual al de retención (t) que es el tiempo en el que la materia orgánica recorre el biodigestor desde la entrada hasta la salida del mismo.

El tiempo de retención debe garantizar una correcta degradación de la materia orgánica, estimándose que el proceso reduce un 60 % de los sólidos volátiles alimentados al biodigestor.



Su composición o bien la reducción de agentes patógenos y materia orgánica están determinadas por la temperatura del ambiente, ya que los biodigestores de polietileno tubular no tienen corriente de energía externa, y el tiempo de retención.

Se han encontrado en la bibliografía recomendaciones sobre el uso del biol; que se utilice diluido en agua en proporciones que varían alrededor de 30 % a 1 % de biol, con un límite de 50 % de acuerdo al uso que se le quiera dar ya sea para suelo, para riego foliar con un máximo de 30 % para semillas.

### **I.8.3. BIOSOL.**

En un biodigestor tubular el efluente es el líquido biol con bajo contenido de sólidos, ya que una parte de los sólidos alimentados se van acumulando dentro del biodigestor; a esta parte sólida se denomina biosol.

El biosol es la parte con alto contenido de sólidos del efluente de un biodigestor.

En otros modelos de biodigestor el efluente está formado por ambas partes: la sólida y la líquida, de ahí que la parte líquida se diferencia de la sólida denominándose biol y biosol respectivamente.

## **I.9. CINÉTICA DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

### **I.9.1. CINÉTICA DE LAS REACCIONES.**

La cinética química trata principalmente del estudio de la velocidad de reacción, considerando todos los factores que influyen sobre ella y explicando la causa de la magnitud de esa velocidad.

La velocidad de una reacción puede estar afectada por diversas variables. Por ejemplo, en sistemas homogéneos las variables son la temperatura, la presión y la composición, mientras que en los sistemas heterogéneos al estar presente más de una fase, el problema será más complejo ya que podrían pasar materiales de una fase a otra, siendo una variable importante la velocidad de transporte de materia. En estos sistemas podría también la transmisión de calor ser una variable importante al momento de determinar la velocidad de reacción (Levenspiel, 1987).

En todos los casos considerados, si la reacción global consta de varias etapas en serie; la etapa más lenta es la que ejerce la mayor influencia y podemos decir que es la etapa controlante. Un problema importante es determinar qué variables afectan a cada una de estas etapas y en qué grado; sólo si se conoce la magnitud de cada factor, tenemos una representación clara del efecto de estas variables sobre la velocidad de reacción, y sólo si disponemos de esta información podemos extrapolar estas velocidades a condiciones nuevas y diferentes.

La velocidad de reacción puede definirse empleando magnitudes intensivas mejor que extensivas en función de un componente  $i$ . Como indica Levenspiel, O, (1987) en el libro Ingeniería de las Reacciones Químicas, si la velocidad de cambio en el número de moles de ese componente debido a la reacción  $r$  es:

$$r = \frac{dN}{dt} \quad (1 - 1)$$

Entonces la velocidad de reacción en sus diferentes formas se define como:

Basada en la unidad de volumen del fluido reactante:

$$r_i = \frac{1}{V} \times \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{volumen de fluido})(\text{tiempo})} \quad (1 - 2)$$

Basada en la unidad de masa de sólido en los sistemas sólido-fluido:

$$r'_i = \frac{1}{W} \times \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{masa de sólido})(\text{tiempo})} \quad (1 - 3)$$

Basada en la unidad de superficie de interfase en los sistemas de dos fluidos, o basada en la unidad de superficie de sólido en los sistemas gas-sólido:

$$r''_i = \frac{1}{S} \times \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{superficie})(\text{tiempo})} \quad (1 - 4)$$

Basada en la unidad de volumen de sólido en los sistemas gas-sólido:

$$r'''_i = \frac{1}{V_s} \times \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{volumen de sólido de reactor})(\text{tiempo})} \quad (1 - 5)$$

Basada en la unidad de volumen del reactor, si es diferente de la velocidad basada en la unidad de volumen de fluido:

$$r_i'''' = \frac{1}{V_r} \times \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{volumen de reactor})(\text{tiempo})} \quad (1 - 6)$$

La velocidad de reacción es función del estado del sistema, es decir:

$$r_i = f(\text{estado del sistema})$$

Según la definición de la velocidad de reacción sólo cambia el coeficiente de proporcionalidad y sus dimensiones.

A partir de las ecuaciones 1 a la 6, estas definiciones intensivas de velocidad de reacción están relacionadas por:

$$Vr_i = Wr_i' = Sr_i'' = V_s r_i''' = V_r r_i'''' \quad (1 - 7)$$

Para reacciones donde no se conozca la estequiometria se puede utilizar el siguiente el siguiente modelo cinético:

$$(r_i) = kC_i^n \quad (1 - 8)$$

Donde:

$k$  = Coeficiente cinético de la reacción

$C_i$  = Concentración del componente  $i$

$n$  = Orden de la reacción

Las constantes  $k$  y  $n$  se determinan a partir de datos experimentales.

## I.9.2. CINÉTICA PARA LA DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.

El proceso de descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno: digestión anaerobia, que se estudia tiene lugar en el biodigestor de polietileno tubular experimental:

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3  
Esquema del biodigestor experimental.



Fuente: Elaboración propia. 2015.

Como se muestra en la Figura I-3, el biodigestor es alimentado con una mezcla de agua y estiércol para obtener un fertilizante natural denominado Biol. El proceso disminuye la presencia de agentes patógenos, en la mezcla de entrada, por eso se estudia cómo varían los siguientes parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno y Coliformes Fecales. Ambos parámetros permiten conocer el grado de contaminación de la materia prima y producto, y verificar si el Biol obtenido del proceso es o no manejable por el ser humano sin que represente un peligro (por ejemplo, el cumplimiento del máximo permitido de Coliformes Fecales de acuerdo a la Ley del Medio Ambiente para descargas líquidas y aguas vertidas a cultivos que es de 1000 NMP/l).

Es por eso que, para la determinación de la cinética de descomposición de la materia orgánica en el biodigestor experimental, se estudia cómo varía la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y los Coliformes Fecales (CF) en función del tiempo de retención ( $t$ ) ya que en la práctica el tiempo es la variable que se puede medir y manejar.

Se parte de la ecuación número (1-1) para adecuarla al presente estudio.

Para la cinética de la variación de la demanda bioquímica de oxígeno, tenemos que:

$$(-r_{DBO_5}) = f(\text{tiempo})$$

Entonces la velocidad de variación de la  $DBO_5$  sería:

$$(-r_{DBO_5}) = -\frac{d(DBO_5)}{dt} = \frac{\text{Demanda Bioquímica de Oxígeno}}{\text{tiempo}} \quad (1 - 9)$$

El signo negativo (-) es para indicar que los coliformes fecales desaparecen o se consumen durante el proceso.

Y la cinética de la variación de los coliformes fecales:

$$(-r_{CF}) = f(\text{tiempo})$$

$$(-r_{CF}) = -\frac{d(CF)}{dt} = \frac{\text{Coliformes Fecales}}{\text{tiempo}} \quad (1 - 10)$$

Haciendo un análisis dimensional de las ecuaciones anteriores, tendríamos que la velocidad de variación de la  $DBO_5$  es:

$$(-r_{DBO_5}) = -\frac{d(DBO_5)}{dt} [=] \frac{\frac{mg}{l}}{(\text{día})} [=] \frac{mg}{(l)(\text{día})}$$

Y la cinética de la variación de los coliformes fecales:

$$(-r_{CF}) = -\frac{d(CF)}{dt} [=] \frac{\frac{NMP}{l}}{(\text{día})} [=] \frac{NMP}{(l)(\text{día})}$$

#### **I.10. BIODIGESTORES.**

Los biodigestores son recintos o tanques cerrados herméticamente donde la materia orgánica se transforma por la actividad metabólica de microorganismo en ausencia de oxígeno, este proceso es llamado: digestión anaerobia, y requiere de un periodo de tiempo adecuado para lograr la descomposición de la materia orgánica produciendo biogás y abonos orgánicos. Reciben también el nombre de plantas de biogás.

En términos ingenieriles se trata de un biorreactor con un tiempo de retención (tiempo de diseño) adecuado para que la materia orgánica inicial pueda transformarse dando dos productos uno gaseoso: biogás, rico en metano y el otro líquido: biol, biosol. El tiempo de retención debe de garantizar que el líquido efluente que se utiliza como abono orgánico no presente riesgos para el manejo por las personas, en caso contrario se debe de agregar un sistema adicional de estabilización del efluente, realizando tratamientos con temperaturas altas, lagunas de oxidación, etc. (Rueda Salgado, 2013).

Los biodigestores deben de tener cierta cantidad de lodos adentro con bacterias que permitan que al entrar en contacto con la alimentación degraden la materia orgánica.

### **I.10.1. TIPOS DE BIODIGESTORES.**

De acuerdo a la forma de contacto entre la alimentación y la población de bacterias en el biodigestor (reactor), se definen dos tipos de biodigestores:

- **Biodigestores de mezcla completa:** donde la concentración en cualquier punto del biodigestor es prácticamente la misma.
- **Reactores de filtro anaeróbico, lechos expandidos y fluidizados y las unidades U.A.S.B. (Proceso anaerobio de mantos de lodo de flujo ascendente):** Se basan en la tendencia de las bacterias especialmente las metanogénicas a fijarse sobre superficies sólidas.

#### **I.10.1.1. BIODIGESTOR DE MEZCLA COMPLETA.**

Denominados así porque el sustrato a ser digerido y los microorganismos encargados de su degradación se encuentran formando una sola unidad, dentro del digestor, originándose la fermentación de la materia orgánica. Como ejemplos de esto tenemos los digestores rurales, de fácil operación, así como los digestores construidos en Francia, China y la India.

Los modelos de digestores clásicos industriales son esencialmente de tipo de mezcla completa con una recirculación del líquido en suspensión y con agitación mecánica.

### **I.10.1.2. REACTORES DE FILTRO ANAERÓBICO, LECHOS EXPANDIDOS Y FLUIDIZADOS Y LAS UNIDADES U.A.S.B. (UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET).**

Estos biorreactores están basados en la tendencia que tienen las bacterias, especialmente las metanogénicas a fijarse sobre superficies sólidas.

La carga incremental en un reactor de flujo continuo sin retención de microorganismos y / o materia orgánica ocasiona un lavado y por lo tanto una disminución del proceso ya iniciado. De ahí que se han intentado algunos mecanismos en los cuales se busca separar los sólidos del efluente y recargarlos al cuerpo del reactor, o también retornar parte del efluente con sólidos en suspensión al cuerpo del mismo.

En los reactores de filtro fijo, las bacterias se adhieren sobre soportes estacionarios y especialmente provistos para tal fin, en cambio en las U.A.S.B. y reactores similares, la adherencia se da entre las propias bacterias formándose flóculos que tienen la capacidad de sedimentar a velocidades superiores que la velocidad neta del líquido, (Silva, 1991).

El sistema que ha obtenido éxito en el medio rural es el digestor con filtro anaeróbico, donde el agua residual al entrar en el digestor se le hace pasar a través de una cama de soporte de material poroso inerte, que contiene gravas, rocas, carbón activado, ladrillos triturados, sepiolita, conchas marinas (Huysman, 1998) (Wilks, 1984), o multitud de materiales plásticos, como anillos de P.V.C. o de Poliuretano (espuma) (París, 1986); silicatos: Saponita, montmorillonita, etc.

El filtro anaeróbico tiene la característica de aumentar el tiempo de residencia de los microorganismos en su interior, por estar formando por una matriz que posee una mayor superficie de contacto, donde se fijan las bacterias metanogénicas.

### **I.10.2. COMPONENTES DE UN BIODIGESTOR.**

Un biodigestor se compone en general de las siguientes partes:

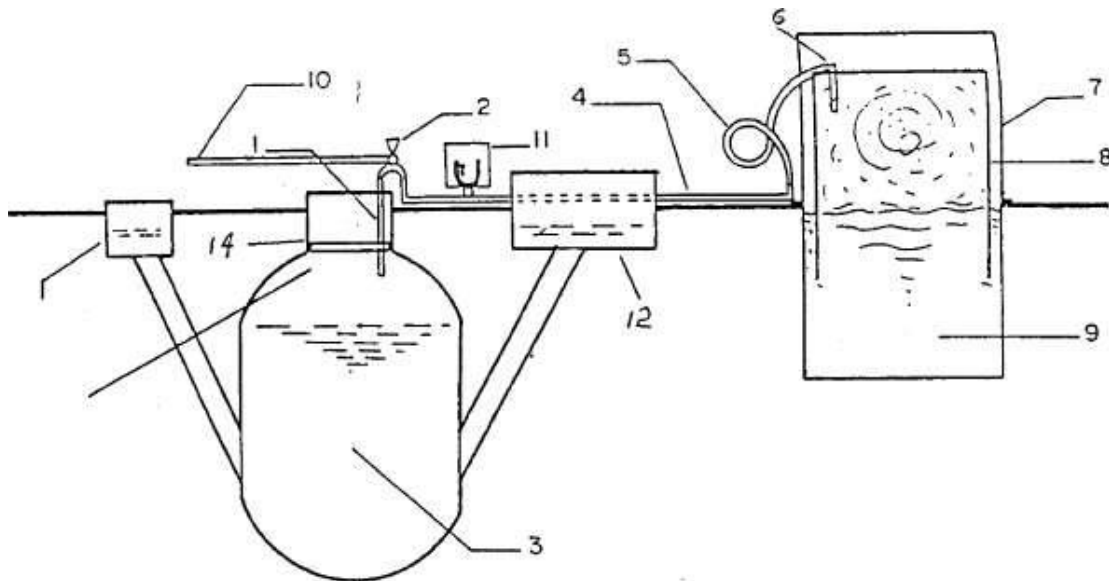
- Tubo de entrada de materia orgánica.

- Cámara de fermentación o cuerpo del Digestor.
- Cámara de depósito de gas.
- Cámara de salida de materia estabilizada o fermentada.
- Conducto de gas, lleva el gas para ser usado.
- Tapa hermética.
- Gasómetro o cúpula que aloje el gas.

Estas partes se encuentran en todos los biodigestores y dependiendo del modelo de biodigestor, proceso, condiciones de diseño y grado de complejidad, pueden variar las partes adicionales al sistema.

A continuación, la Figura I-4 esquematiza un Biodigestor con gasómetro separado de la cámara donde se verifica el proceso.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4**  
Esquema operativo del sistema Biodigestor - Gasómetro.



Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

Donde se distinguen las siguientes partes:

1. Tubo que conduce el gas fuera del biodigestor.



2. Llave reguladora del uso del biogás.
3. Biodigestor, cámara de digestión anaerobia.
4. Tubería que conduce el gas desde el Biodigestor hasta el Gasómetro.
5. Manguera flexible.
6. Tubería de entrada y salida del gasómetro.
7. Barras guías del gasómetro.
8. Gasómetro.
9. Tanque de agua sobre el cual flota el gasómetro.
10. Tubería de distribución del biogás.
11. Manómetro.
12. Cámara de Salida del Efluente.
13. Tubería de Entrada.
14. Tapa Hermética.
15. Cámara de depósito de biogás.

### **I.10.3. CLASIFICACIÓN DE LOS BIODIGESTORES.**

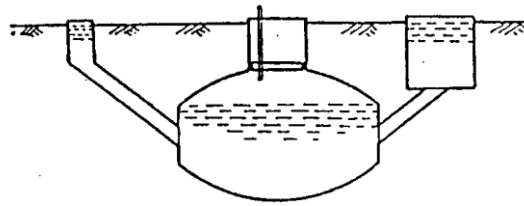
Por la forma y estructura de los biodigestores, pueden clasificarse en los siguientes diseños estructurales:

#### **I.10.3.1. DE ACUERDO AL ALMACENAMIENTO DE GAS.**

De acuerdo al almacenamiento de gas los biodigestores se clasifican como sigue:

- **Cúpula fija:** El recinto o cámara donde se acumula el gas que se produce durante el proceso se encuentra incorporado en el biodigestor y se mantiene fijo ante cambios de presión como se muestra en la siguiente figura:

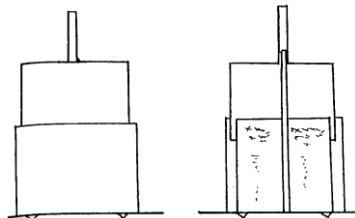
Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-5**  
Biodigestor de cúpula fija.



Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

- **Cúpula móvil:** El recinto o cámara donde se acumula el gas incorporado en el biodigestor y se mueve (sube o baja) ante cambios de presión como se muestra en la siguiente figura:

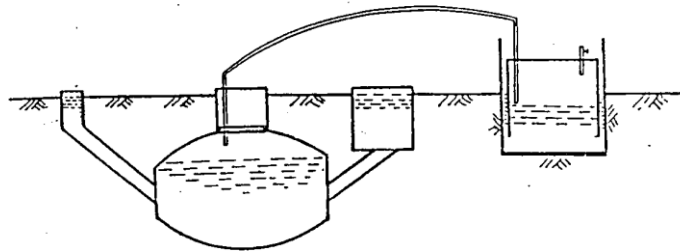
Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-6**  
Biodigestor de cúpula móvil.



Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

- **Con depósito flotante, o de presión constante:** El recinto donde se almacena el gas está sumergido en agua dentro de un tanque, como lo muestra la Figura 2-6.

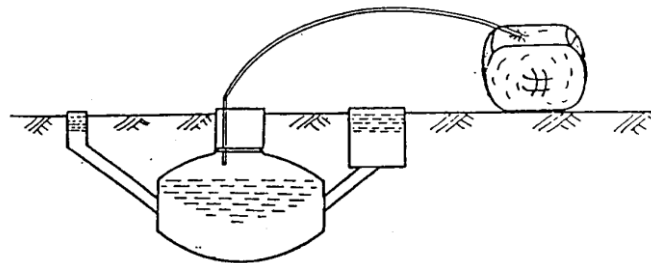
Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-7**  
Biodigestor con depósito flotante o de presión constante.



Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

- **Con gasómetro de Caucho o material plástico en forma de Bolsa:** El recinto donde se almacena el gas es de caucho. La siguiente figura esquematiza este diseño:

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8**  
Biodigestor con gasómetro de caucho o material plástico.



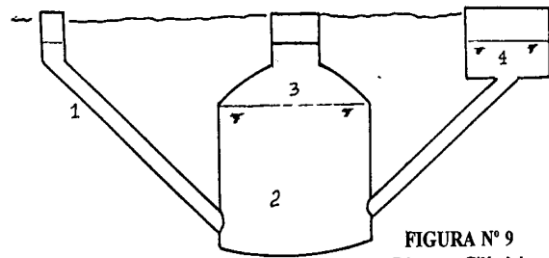
Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

### **I.10.3.2. DE ACUERDO A LA FORMA GEOMÉTRICA.**

Los biodigestores pueden ser construidos de diversas formas geométricas como se indica a continuación. Cada diseño deberá ser capaz de alojar la materia orgánica a degradar.

- **Cámara vertical cilíndrica:**

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9**  
Biodigestor de cámara vertical cilíndrica.

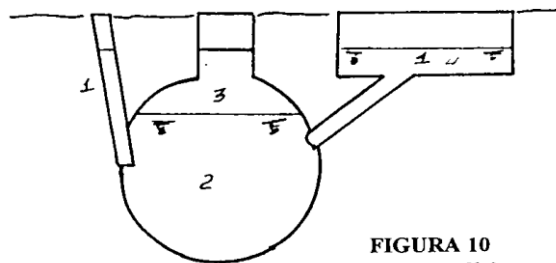


**FIGURA N° 9**  
**Digestor Cilíndrico**  
 Fuente: Tomado del Biogas 1986

Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

- **Cámara esférica:**

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-10  
 Biodigestor de cámara esférica.



**FIGURA 10**  
**Digestor Esférico**

Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

- **Cámara ovalada:**

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11  
 Biodigestor de cámara ovalada.

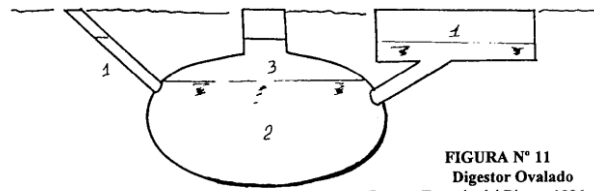
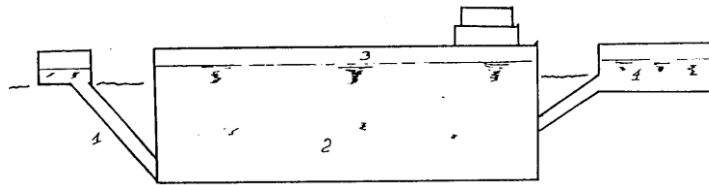


FIGURA N° 11  
 Digestor Ovalado  
 Fuente: Tomado del Biogas 1986

Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

- **Cámara rectangular:**

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-12  
 Biodigestor de cámara rectangular.



Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

- **Cámara cuadrada:**

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-13  
 Biodigestor de cámara cuadrada.

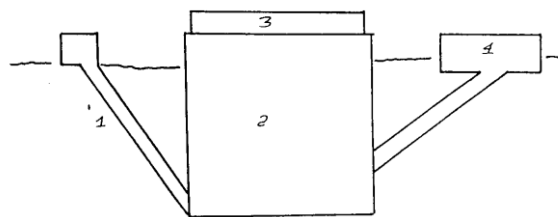


FIGURA N° 13  
 Digestor Cuadrado  
 Fuente: Elaboración propia

Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

### **I.10.3.3. DE ACUERDO A LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

De acuerdo a los materiales con los que son construidos, los biodigestores pueden ser: de ladrillo, de mampostería, de hormigón, de hormigón armado, de plástico, de polietileno, de geomembrana de polietileno, de geomembrana de PVC.

### **I.10.3.4. SEGÚN SU POSICIÓN RESPECTO A LA SUPERFICIE TERRESTRE.**

De acuerdo a la ubicación del biodigestor respecto de la superficie terrestre, los biodigestores pueden ser superficiales, semienterrados y subterráneos. Las figuras a continuación esquematizan cada uno de ellos:

Revisar lo siguiente con la nueva numeración

- Superficiales, como lo muestra la Figura I-6.
- Semienterrados, como lo muestra la Figura I-13.
- Subterráneos, como lo muestra la Figura I 11.

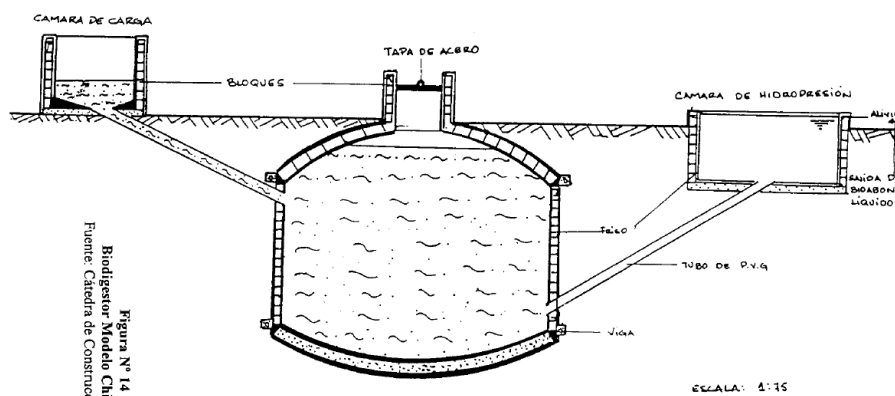
### **I.10.4. MODELOS DE BIODIGESTORES.**

- **Modelo Chino, de cúpula fija:** generalmente de concreto enterrados con una cúpula fija para la acumulación del biogás.
- **Modelo Indio, de cúpula móvil:** de concreto y gasómetro de acero.
- **Modelos Horizontales:** de forma rectangular enterrados con cúpula desmontable metálica.
- **Modelos Batch:** similares a los modelos chino e indio, pero de una sola carga su cúpula metálica tiene sello de agua.
- **Biodigestor de Polietileno Tubular:** a un rectangular porque se asemeja a un flujo pistón, de polietileno.
- **Biodigestor de Laguna Cubierta:** son básicamente lagunas enterradas impermeabilizadas con geomembrana.

### I.10.4.1. MODELO CHINO O DE CÚPULA FIJA.

Este modelo está muy difundido en China, es un digestor de cúpula fija en forma cilíndrica, enterrados con cámaras de Hidropresión. La figura siguiente muestra este tipo de biodigestor:

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-14  
Biodigestor modelo chino: capacidad 150 m<sup>3</sup>.



Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

La estructura puede ser de hormigón, de ladrillos, bloques y adobes, se le puede adicionar el gasómetro. Este digestor por estar enterrado favorece el proceso fermentativo, con poca influencia por los cambios de temperatura. La desventaja que presenta es que la presión del gas es variable dependiente del volumen acumulado.

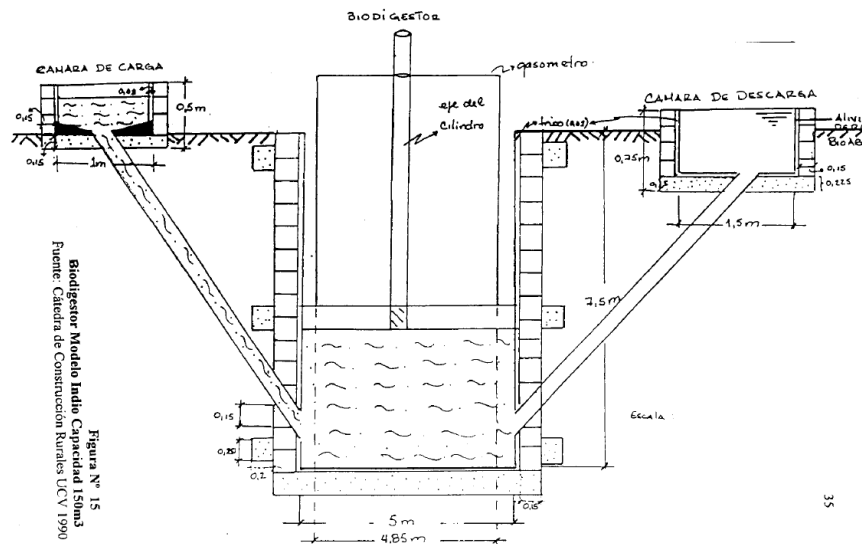
### I.10.4.2. MODELO INDIO O DE CÚPULA FLOTANTE.

Es originario de la India y se ha difundido mucho porque mantiene una presión de trabajo constante. Generalmente son verticales, con el gasómetro incorporado (por lo que se llama digestor de Cúpula Móvil), la estructura se construye de bloques y concreto, y el gasómetro es de acero, lo que lo hace costoso.

El "Gasómetro" posee una camisa que se desliza en un eje y lo mantiene centrado para que no roce con las paredes ni escorcese, este eje descansa en una viga transversal de concreto armado enjaulado.

Estos digestores son de alimentación continua, se construyen generalmente enterrados quedando la cúpula sin gas en un nivel cercano a la superficie del terreno, como lo muestra la figura siguiente.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-15  
Biodigestor modelo indio: capacidad 150 m<sup>3</sup>.



Fuente: Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Rurales. (Guevara Vera, 1996).

#### I.10.4.3. MODELOS HORIZONTALES.

Se habla de digestores horizontales cuando éstos no profundizan en el suelo, son de forma rectangular, aunque pueden ser cuadrados, se caracterizan por ser en su mayoría de concreto armado debido a las presiones a las que están sometidos. Su uso es generalmente para el saneamiento de descargas cloacales, ya que su conformación a la larga garantiza que el efluente al salir del cuerpo del digestor, debido al flujo pistón y al tiempo de retención sean debidamente degradados.

Estos digestores llevan generalmente en la parte superior una pequeña cúpula metálica desmontable que sirve de boca de visita. La presión se controla por el sello de agua; además requieren gasómetro adicional debido a la poca capacidad de almacenamiento de la cúpula y el cuerpo del digestor.



#### **I.10.4.4. MODELOS BATCH POR LOTES.**

Estos digestores se caracterizan porque se cargan una sola vez, tienen una cúpula metálica con sello de agua, la estructura se construye con bloques y concreto reforzado. La desventaja es que se debe construir obligatoriamente un gasómetro y al ser aéreos están afectados por la temperatura ambiental. Se utilizan para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales, desechos sólidos orgánicos; el requisito básico es utilizar una buena inoculación de bacterias, (5 al 10 % en base al peso), para garantizar una buena fermentación.

El rendimiento volumétrico de gas es superior a cualquier digestor continuo debido al contenido de sólidos totales, igualmente el rendimiento de abonos sólidos es elevado. Por eso este método permite el tratamiento sanitario de desperdicios orgánicos, el control satisfactorio de toda clase de plagas, así como la proliferación de moscas; así mismo la recuperación eficiente y económica del metano y la retención de humus e ingredientes para uso de fertilizantes (Guevara Vera, 1996).

#### **I.10.4.5. BIODIGESTOR DE POLIETILENO TUBULAR.**

Este es un modelo de biodigestor que se ha venido instalando en Bolivia en diferentes regiones tanto en altiplano, valle y trópico desde el año 2002 con buenos resultados, la mayoría de los biodigestores instalados continúan funcionando (Martí Herrero, 2008).

Son biodigestores más que todo de uso familiar y de bajo costo. Es así que se consideran una tecnología apropiada por su bajo costo de inversión, fácil operación, por requerir poco mantenimiento y ser accesible tanto a pequeños como a los grandes productores (Martí Herrero, Acosta Bedoya, & Gonzales, Plan Nacional de Biodigestores de Bolivia, 2013).

Está constituido básicamente por un tubo de polietileno que en un extremo tiene una tubería de entrada, en el otro una de salida y en la parte superior media una tubería de salida de biogás. El tubo se sitúa en una zanja que constituye las paredes de soporte y

protección; se puede dar el caso en que se levanten paredes sobre el suelo en lugar de cavar la zanja.

#### **I.10.4.6. BIODIGESTOR DE LAGUNA CUBIERTA.**

El proceso de digestión anaerobia en un biodigestor de laguna cubierta tiene lugar en una laguna excavada impermeabilizada y cubierta, el material que se utiliza para esto es geomembrana (de PVC, o polietileno). Es una tecnología adecuada para climas templados y cálidos. Este sistema, por lo general, no requiere flujo de calor externo porque trabaja a temperatura ambiente y presión atmosférica y el único calor que absorbe es por radiación solar.

La ganancia térmica por radiación solar varía durante el día y en cada época del año. Consta de partes y sistemas auxiliares que se resumen a continuación:

1. Cámara de Alimentación
2. Biodigestor de Laguna Cubierta
3. Tanque de Almacenamiento de Biol
4. Tubería para la Conducción de Líquidos (alimentación, efluente) y Biogás
5. Trampas de Agua
6. Válvula de Seguridad
7. Medidor de Flujo de Biogás
8. Filtro de Sulfuro de Hidrógeno
9. Generador Eléctrico a Biogás
10. Bomba de Lodos.

### **I.11. VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE COLIFORMES FECALES Y DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DE ACUERDO A LA LEY DEL MEDIO AMBIENTE N°1333.**

De acuerdo al Cuadro N° 1 del Anexo A del Reglamento en materia de contaminación hídrica “Clasificación de cuerpos de agua según su aptitud de uso” de la Ley del Medio Ambiente (Ley N° 1333 del 27 de abril de 1992), el biol corresponde a un cuerpo de agua de Clase A o de Clase B; uso “para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas crudas sin remisión de ella”.

En el Cuadro N° A-1 “Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores” del mismo reglamento. En la tabla siguiente se indican los valores máximos admisibles de coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos totales para un agua de Clase B.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-14 Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpo de agua Clase B.

<b>PARÁMETROS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANCERÍGENOS</b>	<b>CLASE B</b>
Sólidos disueltos totales	mg/l	NO	1000
DBO5	mg/l	NO	<5
NMP Colifecales	NMP/100ml	NO	<1000

Fuente. Ley del Medio Ambiente N° 1333. Edición 2016.

Además de acuerdo al Anexo D Límites permisibles para descargas líquidas extraído de la Ley del Medio Ambiente N° 1333, el límite para la DBO<sub>5</sub> es 80 mg/ l y para los coliformes fecales 1000 NMP/100ml. Para el presente estudio se toman estos últimos valores como los máximos permisibles para el biol.

**CAPÍTULO II**  
**PARTE EXPERIMENTAL.**

## CAPÍTULO II

### II. PARTE EXPERIMENTAL.

#### II.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.

El presente Proyecto de Grado tiene entre sus fines conocer, adecuar y apropiarse de la tecnología de los biodigestores. Como se ha mencionado, el biodigestor de polietileno tubular instalado en la Empresa Agrícola Huayrihuana en la Comunidad Barrientos del Municipio de Uriondo, es en su tipo el primero del valle central de Tarija, mismo que viene funcionando con algunas deficiencias desde mayo del 2014, esto hace necesario un estudio para conocer esta tecnología y que pueda implementarse en otras fincas que lo quieran.

En este sentido, la Empresa Agrícola Huayrihuana en coordinación entre la RASP (Red de Apoyo al Sector Productivo de Tarija) y la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, encaran el proyecto para conocer la operación de este biodigestor y caracterizar el producto líquido obtenido que se denomina biol, caracterizar la materia prima y estudiar el proceso y la cinética de descomposición de la materia orgánica y a partir de ella rediseñar el biodigestor tomando en cuenta normas ambientales.

Es así que se construye e instala el biodigestor de polietileno tubular experimental más pequeño pero similar al de la empresa Huayrihuana el cual se implementa en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS) para poder operar y realizar el seguimiento que se requiere.

El biodigestor experimental implementado en el LOU de la UAJMS, se alimenta con una mezcla de agua y estiércol vacuno, el biogás producido es venteado y el producto líquido biol, objeto de estudio en este trabajo, es necesario caracterizarlo para cuantificar la disminución de los agentes patógenos, establecer el rendimiento y eficiencia del biodigestor, indicar si el mismo está dentro de los límites de acuerdo a características para este tipo de productos que son manipulados por los agricultores y

a las normas ambientales vigentes en nuestro país, en caso de no ser así proponer un tratamiento posterior.

La mezcla de agua y estiércol vacuno alimentada al biodigestor en este trabajo de aquí en adelante se denomina: mezcla de entrada al biodigestor, estiércol preparado, alimentación o carga al biodigestor indistintamente.

### **II.1.1. FACTORES CONSIDERADOS EN EL DISEÑO Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR DE POLIETILENO TUBULAR EXPERIMENTAL.**

El diseño de un biodigestor de polietileno tubular depende directamente de varios parámetros tales como la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar. Por otro lado, la carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día. La carga de estiércol diaria, junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura), determinarán el volumen del biodigestor. (Martí, 2008).

Para el diseño del biodigestor experimental de laboratorio se sigue la metodología empleada por Martí (2008) en su libro “Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación”, y manteniendo algunas características del biodigestor de la finca Huayrihuana instalado por el mismo autor.

La relación L/D del biodigestor de la finca es de 5, el tiempo de retención de 49 días, y el diámetro deseado del biodigestor experimental es de 15,65 cm. Con estos datos procedemos al cálculo de la longitud y volumen del biodigestor.

*L = Longitud del biodigestor, m*

*D = Diámetro del biodigestor, m*

*V = Volumen del biodigestor, m<sup>3</sup>*

*V<sub>L</sub> = Volumen de líquido en el biodigestor, m<sup>3</sup>*

*V<sub>G</sub> = Volumen de gas en el biodigestor, m<sup>3</sup>*

*A<sub>t</sub> = Área transversal de un cilindro, m<sup>2</sup>*

$t =$  tiempo de retención, día

$E =$  Caudal de alimentación diaria al biodigestor,  $\frac{m^3}{día}$

$E_a =$  Caudal de agua de alimentación diaria al biodigestor,  $\frac{m^3}{día}$

$E_e =$  Caudal de estiércol de alimentación diaria al biodigestor,  $\frac{kg}{día}$

Siendo:

$$\frac{L}{D} = 5 \quad y \quad D = 15,65 \text{ cm} = 0,1565 \text{ m}$$

La longitud del biodigestor:

$$L = 5 \times 15,65 \text{ cm} = 78,30 \text{ cm} = 0,7830 \text{ m}$$

Y el volumen sería igual al volumen de un cilindro:

$$V = A_t \times L = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L \quad (2 - 1)$$

$$V = \frac{\pi}{4} \times 15,65^2 \times 78,30 = 15061,9197 \text{ cm}^3 = 15,0619 \text{ l} = 0,0151 \text{ m}^3$$

Los porcentajes de la fase líquida y fase gaseosa en biodigestores se recomiendan por lo general entre 70-75 % para la fase líquida y 25-30 % para la fase gaseosa.

Se adopta un porcentaje de 70 % para la fase líquida, de manera que:

$$V_L = 0,7 \times V = 0,70 \times 15061,9197 \text{ cm}^3 = 10543,3438 \text{ cm}^3 = 0,0105 \text{ m}^3$$

$$V_G = 0,30 \times V = 0,30 \times 4518,5759 \text{ cm}^3 = 4,5186 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 = 0,0045 \text{ m}^3$$

La alimentación diaria del biodigestor será el volumen líquido entre el tiempo de retención:

$$E = \frac{V_L}{t} \quad (2 - 2)$$

$$E = \frac{V_L}{t} = \frac{10543,3438 \text{ cm}^3}{49 \text{ día}} = 215,3261 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}} = 215 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}} = 0,0002 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

La alimentación del biodigestor es estiércol vacuno mezclado con agua, se recomienda que la relación agua/estiércol de la mezcla tenga un porcentaje en peso de sólidos totales menor al 6 % en biodigestores tubulares.

La relación agua estiércol que se maneja en el biodigestor de la finca es de 3/1, se mantuvo esta relación en el primer biodigestor puesto en marcha y se tuvo problemas con los sólidos atribuibles al pequeño tamaño del biodigestor experimental. Es por eso que se cambia a una relación 4/1, con lo que los volúmenes diarios de agua y estiércol serían:

$$E = E_e + E_a \quad (2 - 3)$$

$$E = 4E_e + E_e = 5E_e$$

$$E_e = \frac{E}{5} = \frac{215 \frac{cm^3}{día}}{5} = 43 \frac{cm^3}{día}$$

$$E_a = 4E_e = 172 \frac{cm^3}{día}$$

Debido a que la densidad del estiércol es cercana a la unidad y para fines prácticos se asume igual a uno, por lo tanto:

$$E_e = 43 \frac{cm^3}{día} \times \frac{1g}{cm^3} = 43 \frac{g}{día} = 0,043 \frac{kg}{día}$$

De manera que la alimentación al biodigestor se preparó con:

$$m_e = 43 \frac{g}{día}$$

$$E_a = 172 \frac{cm^3}{día} = 0,000172 \frac{m^3}{día}$$

Además, en los biodigestores que se instalan en campo los volúmenes de agua y de estiércol se miden en cubetas o baldes de manera aproximada, por lo que esta aproximación no afecta el proceso debido a que esa proporción se utiliza durante todo el proceso en estudio.



Calculamos el porcentaje de sólidos totales en la alimentación:

$C_1 = 17\% \text{ ST}$ , % de sólidos totales del estiércol, valor medio (bibliografía)

$V_1 = V_1$ , volumen de estiércol

$C_2 =$  concentración de sólidos totales de la alimentación

$V_2 = 5V_1$ , volumen de la alimentación con una relación agua: estiércol de 4: 1

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad (2 - 4)$$

$$C_2 = \frac{C_1 \times V_1}{V_2} = \frac{C_1 \times V_1}{5V_1} = \frac{17\%}{5} = 3,4\%$$

El porcentaje de sólidos totales de alimentación garantiza una dinámica de fluidos adecuada, evitándose acumulaciones de sólidos que perjudiquen el flujo diario de nutrientes y microorganismos que se cargan diariamente al biodigestor.

### **II.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA LA INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.**

Para los biodigestores de polietileno tubular que se han instalado en el país se utiliza principalmente polietileno de 300  $\mu\text{m}$  en color negro, para aprovechar la ganancia térmica por radiación solar. Este polietileno viene en manga, es decir, como un cilindro y lo fabrican en el país a pedido empresas como la cochabambina Flor de Empresa.

Para la conducción de biogás, entrada y salidas del biodigestor se utilizan tuberías de PVC, para el biogás de preferencia tubería de agua caliente por ser más resistente.

A continuación, se describen los materiales utilizados para la construcción del biodigestor experimental:

- 1,5 m de polietileno transparente de 250  $\mu\text{m}$ : el color transparente permite observar qué pasa por dentro en el biodigestor y el de 250  $\mu\text{m}$  es el de mayor espesor en el mercado local.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-16**  
Polietileno de 250 micrómetros de espesor.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- Dos aros de acero inoxidable: uno cercano a la entrada y otro a la salida, para darle la forma y firmeza al biodigestor ya que éste no es enterrado ni tendrá una caja de contención.
- Poxipol.
- Sella roscas de tubería.
- Cinta adhesiva fuerte.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-17 Cinta adhesiva fuerte.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- 5 m de alambre de amarre.
- Goma y liga de neumático.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-18 Goma de neumático.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- 30 cm de tubería PVC de 2 in.
- 30 cm tubería PVC de 1 in.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-19 Tubería de PVC de 1 in.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- 2,5 m tubería PVC de 1/2 in.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-20 Tubería de PVC de 1/2 in.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- Brida de 1/2 in.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-21 Bidas de 1/2 in y de 3/4 in.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- 3 codos de 1/2 in.
- 2 válvulas de bola de 1/2 in.
- 1 válvula de bola de 3/4 in.
- 1 válvula de bola metálica de 1/2 in.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-22  
Válvula de bola metálica de 1/2 in.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- Virulana.
- Unión universal.
- Niple.
- Cupla.
- Reducción de 1 in a  $\frac{3}{4}$  in.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-23  
Accesorios de tubería de 1/2 in.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- 2 botellas plástica de 2 litros.
- 3 cintas teflón.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-24** Cinta teflón.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- 1 lámina de plastoformo de 5 cm de espesor.
- 2 láminas de plastoformo de 3 cm de espesor.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-25** Láminas de plastoformo.



Fuente: Elaboración propia. 2014.

- 1 trupán de 60 x 60 cm.
- 4 palos de madera de 55 cm.
- 2 sockets.
- 2 focos de 100 watt.
- 3 m de cable.
- 2 enchufes.
- 2 m de polietileno de 200  $\mu\text{m}$ .
- Papel aluminio.

#### **II.1.2.1. PRUEBAS PRELIMINARES EN LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.**

Para poder construir el biodigestor de polietileno tubular experimental, se hizo varias pruebas preliminares, ya que para el diámetro requerido del biodigestor no hay manga de polietileno disponible y se tuvo que pegar el polietileno para formar el cilindro. Esta unión debe ser resistente a la presión interna del biodigestor.

Para lograr esa unión se probaron varios pegamentos: como poxipol, pegamento para plásticos, cinta adhesiva fuerte, silicona de vidrios. El pegamento de plásticos y la silicona de vidrio no sirven pues no suelda nada. El poxipol pegaba poco, pero



jalando se soltaba, se combinó con éxito poxipol, sella roscas de tubería para rellenar posibles orificios y cinta adhesiva fuerte para sellar las uniones interna y externa.

La construcción del biodigestor no fue exitosa a la primera prueba. En un principio se construyó un biodigestor con modificaciones incluyendo cuatro deflectores de plastofomo forrados con cinta adhesiva fuerte y dos válvulas de salida de líquido laterales.

El primero no resistió la prueba hidráulica, había fugas por la entrada, salida y unión lateral.

El segundo se llenó rápido de sólidos cerca de la entrada por los deflectores y por el porcentaje de sólidos totales de la alimentación. Además, debido a que se movió el biodigestor forzando la salida de líquido y la baja temperatura ambiente, el proceso no fue exitoso.

La operación del tercero debido a problemas en la Universidad y el Campus cerrado fue interrumpida: se tuvo que vaciar y desechar.

El cuarto biodigestor se operó con éxito tomando en cuenta y corrigiendo los problemas suscitados con los anteriores.

Estas pruebas e incidentes que no habían sido previstos llevaron un tiempo de tres semestres: segundo semestre del 2014, primer y segundo semestres del 2015.

### **II.1.3. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL DE POLIETILENO TUBULAR.**

Se describe a continuación los pasos que se siguieron para la construcción del biodigestor experimental en el L.O.U. de la Universidad A.J.M.S.

- Se cortó polietileno doble de 120 cm de largo y 57 cm de ancho.
- Se puso la brida de ½ in en el centro a unos 60 cm de un lado y 15 cm del otro
- Se formó un cilindro de 120 cm de largo uniendo el polietileno con poxipol aplicado a lo largo en un ancho de 8 cm, sella roscas de tubería en posibles

orificios y cinta adhesiva fuerte por dentro y por fuera, el poxipol. Se dejó secar dos días.

- Se colocaron los aros de aluminio a unos 30 cm de los extremos del cilindro.
- Se procedió con las tuberías de entrada y salida colocadas 10 cm por dentro del polietileno con sella roscas y asegurando con liga de neumático por encima.
- En la salida se colocó una reducción de 1 in a  $\frac{3}{4}$  in para colocar la válvula de salida.
- La conducción de biogás para ventearlo hacia afuera del laboratorio se instaló con tubería de  $\frac{1}{2}$  in tal como se muestra en la siguiente fotografía, primero se cortó cada sección, se le sacó rosca y en cada unión se puso cinta teflón.

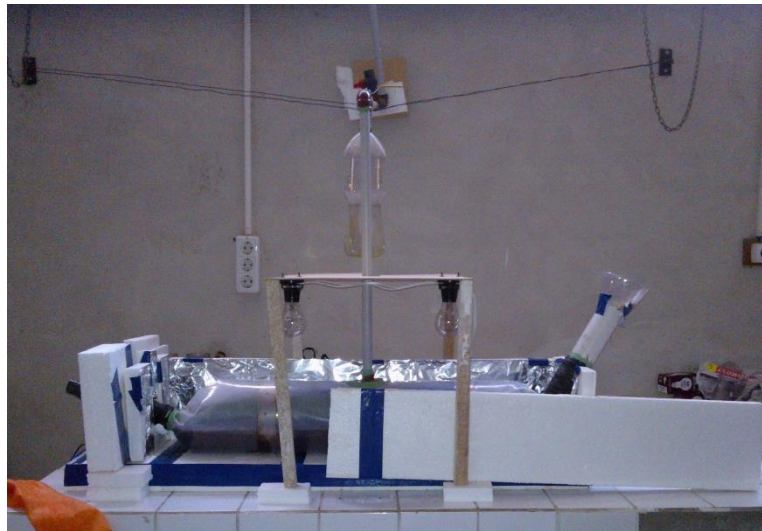
Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-26  
Conducción de biogás y válvula de seguridad.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

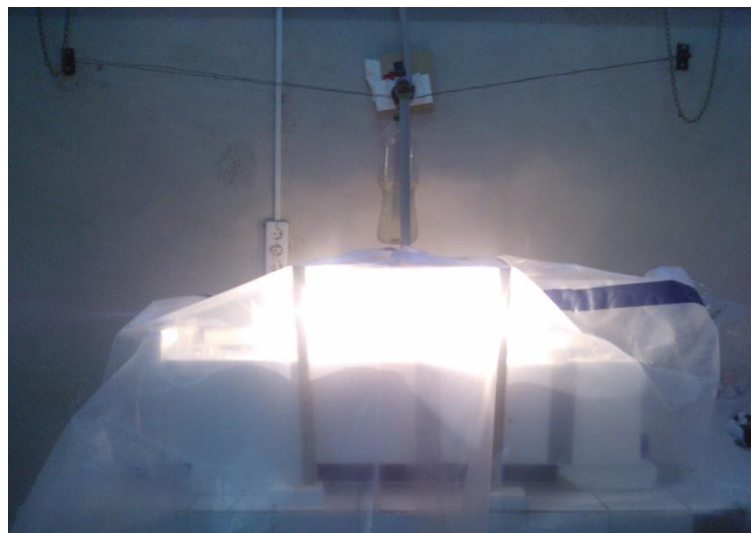
- La válvula de seguridad que da la presión máxima dentro del biodigestor consta de una T con una tubería hacia abajo de 25 cm, sumergida 10 cm en agua contenida en una botella de plástico de 2 litros sostenida con alambre.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-27**  
Biodigestor de polietileno tubular experimental.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-28**  
Biodigestor de polietileno tubular experimental con focos y protección.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

## **II.2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE MATERIAS PRIMAS.**

### **II.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA EL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL: ESTIÉRCOL VACUNO.**

La materia prima a utilizar para el biodigestor experimental ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la U.A.J.M.S. es estiércol vacuno, el mismo proviene del Rancho, provincia Méndez del departamento de Tarija de un establo familiar de vacas lecheras que proveen leche a la empresa Lacteosbol ubicada en la misma provincia.

El establo está cercado por palos de madera y es de tierra de 5m x 10 m aproximadamente.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-29 Establo en El Rancho.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

La ubicación del establo a través del GPS se muestra en la tabla siguiente:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-15**  
Coordenadas GPS del establo.

<b>Fecha</b>	Jueves, 19 de Mayo de 2016
<b>Latitud</b>	21,4427 °S
<b>Longitud</b>	64,7524 °O
<b>Altitud</b>	1991,10 m

Fuente: Elaboración propia. 2016

En el establo hay 7 vacas, dos de las cuales son terneras de un año, se alimentan de alimento balanceado, chala seca, pasto, alfa, avena y silo.

El estiércol que producen se va enterrando en el mismo corral y cada cierto tiempo lo sacan y lo utilizan como abono para los terrenos.

Las características generales del estiércol vacuno se encuentran en la Tabla I-3.

El aspecto del estiércol que se ha muestreado varía: mayormente es más húmedo y de color más claro si es fresco, si pasa algunas horas de la deposición más seca y el color más oscuro. También se han encontrado bichos pequeños en el estiércol y como se recoge del suelo a veces tenía pajitas, alfa o pasto. En cuanto al olor, mientras más fresco el olor característico del estiércol es más fuerte.

En general el estiércol tiene características comunes, pero entre uno y otro pueden existir diferencias dependiendo de su procedencia, del animal y de la alimentación que tiene entre otros.

Para el funcionamiento de un biodigestor tubular, la carga debe ser diaria y con estiércol fresco, de preferencia, o al menos una vez a la semana fresco, (Martí Herrero, 2008).

Para el biodigestor experimental instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad, se trajo estiércol fresco una vez por semana, sirviendo éste para la carga diaria del biodigestor durante la semana. La carga de alimentación es una mezcla de agua y estiércol en una proporción de 4 a 1, esta mezcla se ha denominado también estiércol preparado.

### **II.2.2. DESCRIPCIÓN DE ANÁLISIS DE MATERIA PRIMA: ESTIÉRCOL VACUNO Y ESTIÉRCOL PREPARADO.**

Los parámetros medidos y determinados del estiércol vacuno son los siguientes: Masa, Volumen, Densidad y Humedad.

Del agua: Volumen, Temperatura, pH.

Y de la mezcla de alimentación al biodigestor: Volumen, Temperatura, pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Coliformes Fecales, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Nitrógeno, Fósforo y Potasio totales.

Los análisis de la mezcla de agua y estiércol que alimenta el biodigestor fueron realizados por el CEANID (Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo), el pH fue determinado también personalmente. El Volumen y Temperatura de la mezcla personalmente.

## **II.2.2.1. PARÁMETROS DETERMINADOS PERSONALMENTE.**

### **II.2.2.1.1. MASA.**

Para la medición de masa se realizó en la balanza analítica del laboratorio de operaciones unitarias. Se pesó diariamente los 43 g de estiércol necesarios para preparar la mezcla de alimentación del biodigestor.

### **II.2.2.1.2. VOLUMEN.**

Se midió los volúmenes diarios de agua y de estiércol preparado con probetas de 100 ml, de 250 ml y en la primera carga se utilizó además una probeta de 1000 ml.

### **II.2.2.1.3. TEMPERATURA.**

Para medir la temperatura se utilizó un termómetro de alcohol de 100 °C introduciendo el bulbo en cada muestra y esperando hasta que se estabilice. Se midió diariamente la temperatura del agua y del estiércol preparado.

### **II.2.2.1.4. POTENCIAL DE HIDRÓGENO, pH.**

Se midió el pH con el pHmetro sumergiendo el electrodo durante el tiempo necesario para que se estabilice el valor en la pantalla. Esta medición se realizó diariamente en el agua y en el estiércol preparado a una temperatura de 25 °C.

### **II.2.2.1.5. DENSIDAD.**

Se midió la densidad en el estiércol vacuno se hizo de manera indirecta, midiendo la masa y luego el volumen por desplazamiento de volumen. Esta medición se realizó con una frecuencia semanal en cada muestra de estiércol.

#### **II.2.2.1.6. HUMEDAD.**

La humedad del estiércol vacuno fue medida directamente en balanza de humedad de marca Sartorius del L.O.U de la Universidad A.J.M.S., a 105 °C. Esta balanza eleva la temperatura y la mantiene hasta que toda el agua a dicha temperatura se evapora, hasta que no varíe el peso. Se midió la humedad del estiércol con una masa de 5 g por el tiempo requerido según la muestra que variaba de 30 a 55 min. La frecuencia de esta medición fue semanal, una por cada muestra de estiércol vacuno.

#### **II.2.2.2. PARÁMETROS DETERMINADOS POR EL CEANID.**

Los siguientes parámetros fueron determinados por el CEANID, a continuación, se define cada uno de ellos y se indica la norma que este laboratorio emplea en cada análisis.

##### **II.2.2.2.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.**

La Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO de un líquido se define como la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aerobias o anaerobias facultativas: *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*), hongos y plancton, consumen o necesitan durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se expresa en unidades de mg / l.

A mayor cantidad de materia orgánica contenida en la muestra, más oxígeno necesitan sus microorganismos para oxidarla (degradarla).

Como el proceso de descomposición varía según la temperatura, este análisis se realiza en forma estándar durante cinco días a 20 °C; esto se indica como DBO<sub>5</sub>.

Según las normas medioambientales de cada país, se fijan valores de DBO<sub>5</sub> máximo que pueden tener las aguas residuales, para poder verterlas a los ríos y otros cursos de agua. De acuerdo a estos valores se establece, si es posible arrojarlas directamente o si deben sufrir un tratamiento previo (Durán & Lara, 1994).

Los análisis de DBO<sub>5</sub> fueron realizados por el CEANID, la técnica o método de ensayo que emplean es M 5210-B.



#### **II.2.2.2. COLIFORMES FECALES.**

Los coliformes fecales es un grupo de los coliformes totales, está constituido por bacterias Gram-negativas capaces de fermentar la lactosa con producción de gas a las 48 h de incubación a  $44.5 \pm 0.1$  °C. Este grupo no incluye una especie determinada, sin embargo, la más prominente es *Escherichia coli*.

El *Escherichia coli* es un bacilo corto Gram negativo que se encuentra clasificado dentro de la familia Enterobacteriaceae (bacterias entéricas), existe como comensal en el intestino delgado de humanos y animales. Sin embargo, existen algunas cepas de *Escherichia coli* patógenas que provocan enfermedades diarreicas.

Los análisis de coliformes fecales fueron realizados por el CEANID con la técnica o método SM 9221-C. Se mide en NMP/100ml.

#### **II.2.2.3. SÓLIDOS TOTALES.**

Los sólidos totales incluyen toda la materia, se definen como la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado a 103-105 °C. El valor de los sólidos totales incluye sólidos disueltos y sólidos suspendidos (sólidos suspendidos).

Los sólidos totales se miden en mg/l y se determinaron por el CEANID con la técnica o método de ensayo SM 2540-B.

#### **II.2.2.4. SÓLIDOS VOLÁTILES.**

Los sólidos volátiles son aquellos que se volatilizan a una temperatura de 550°C. Si los sólidos totales se someten a una temperatura de 550 °C durante 20 minutos, la materia orgánica se convierte a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Esta pérdida de peso corresponde a los sólidos volátiles. Los sólidos que no se volatilizan se denominan sólidos fijos totales.

Los sólidos volátiles se miden en mg/l y fueron determinados por el CEANID con la técnica o método de ensayo SM 5520-E.

#### **II.2.2.2.5. NITRÓGENO TOTAL.**

El nitrógeno total de una muestra refleja la cantidad total de nitrógeno, que es la suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados, urea, aminas, etc.) y el ion amonio  $\text{NH}_4^+$ .

Es un parámetro importante en estaciones depuradoras de aguas residuales, ya que mide el nitrógeno total capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos y posteriormente y en su caso, desnitrificado a nitrógeno gaseoso; por lo tanto, no incluye los nitratos ni los nitritos.

El nitrógeno total se mide en mg/l y fue determinado por el CEANID con la técnica o método de ensayo SM 4500-Norg-B.

#### **II.2.2.2.6. FÓSFORO TOTAL.**

El Fósforo total se mide en mg/l y fue realizado por el CEANID con la técnica o método de ensayo SM 4500-P-D.

#### **II.2.2.2.7. POTASIO TOTAL.**

El Potasio total se mide en mg/l y fue determinado por el CEANID con la técnica o método de ensayo SM 3500KB.

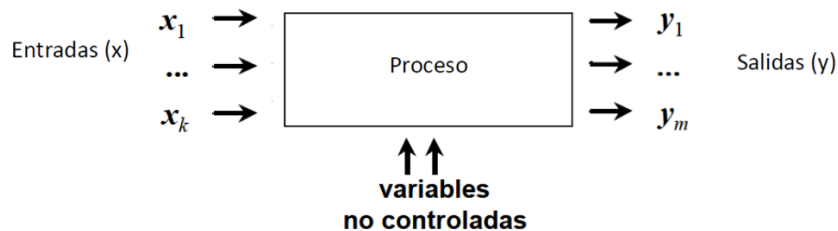
#### **II.2.2.2.8. pH.**

El pH fue determinado por el CEANID bajo la técnica o método de ensayo SM 4500-H-B.

### II.3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.

El diseño experimental es una técnica estadística que se aplica en investigaciones experimentales en diferentes áreas: agricultura, industria, medicina, ciencias de la conducta, etc. Permite conocer mejor las variables involucradas en un proceso como una caja negra, mostrado en la figura siguiente:

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-30**  
Proceso como una caja negra.



Fuente: Análisis de los resultados de un diseño factorial con datos faltantes. Universitat Politècnica de Catalunya.

En este tipo de sistemas se tiene un conjunto de variables de entrada independientes (x) controlables llamadas factores que al participar en un proceso generan variables de salida dependientes (y) llamadas respuestas. Estas respuestas pueden o no depender de otras variables más que no son controladas. No se requiere conocer la relación entre los factores (x) y respuestas (y) (Campos, 2010).

Los biodigestores en general corresponden a este tipo de sistemas pues el proceso de biodigestión anaerobia es complejo y depende de muchas variables y no todas pueden ser controladas y medidas.

En el proceso existen varios factores que afectan en menor o mayor proporción el proceso de fermentación anaerobia, algunos de ellos son: tipo de materia orgánica, relación C/N, Concentración de Sólidos Totales ST, temperatura ambiente, temperatura de trabajo, tiempo de retención, pH, promotores e inhibidores de la fermentación. Estos factores pueden condicionar la variación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, los Coliformes Fecales CF, la Demanda Química de Oxígeno DQO, entre otras (Guevara Vera, 1996) (Hilbert, 2011).

El biodigestor experimental tiene una entrada de alimentación, una salida para el biogás y otra para el producto líquido. Funciona a temperatura ambiente ya que se encuentra dentro del laboratorio y tiene calefacción de focos por radiación, que simulan el aporte térmico por radiación solar que reciben los biodigestores de este tipo. Los dos focos utilizados de 100 watt se encuentran a unos 15 cm por encima del biodigestor y la temperatura no es controlada para mantenerla constante, sino que depende de la temperatura ambiente. El biodigestor y focos están cubiertos por polietileno a manera de invernadero.

Es así que las variables que se pueden modificar o controlar es el tiempo de retención mientras que las variables de salida son la demanda bioquímica de oxígeno  $DBO_5$  y los coliformes fecales  $CF$ . Para ello se deben realizar mediciones de  $DBO_5$  y  $CF$  a medida que transcurre el proceso desde su inicio hasta que se estabilice, es decir hasta que el producto de salida del biodigestor sea constante, esto debería ocurrir en un tiempo de retención total estimado de 49 días.

#### **II.4. DISEÑO EXPERIMENTAL.**

Existen diferentes tipos de diseños de experimentos entre los que se encuentran los diseños experimentales de un solo factor, es decir de una sola variable independiente.

El diseño experimental de un solo factor es el que permite obtener datos de  $DBO_5$  y  $CF$  para la determinación de la cinética de degradación de la materia orgánica.

Variable de entrada independiente, factor:

$$x = \text{tiempo de retención, } t$$

Variables de salida dependientes, respuestas:

$$y_1 = \text{Demanda bioquímica de oxígeno, } DBO$$

$$y_2 = \text{Coliformes fecales, } CF$$

La planificación del experimento se resume en el siguiente cuadro:

Cuadro **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2**  
Resumen de la planificación del experimento.

<b>FACTOR</b>	<b>Tiempo de retención (día)</b>	49 días es el tiempo de retención mínimo, utilizado para el diseño del biodigestor	
<b>RANGO</b>	<b>Rango de 0 a 77 días</b>	77 días es la suma del tiempo de retención mínimo más un 50 % del mismo	
	<b>Tiempo mínimo para toma de muestras (día)</b>	14 días es el tiempo estimado en el que empezará a salir el producto biol del biodigestor para poder muestrear.	
<b>NIVELES (a)</b>	<b>Número de Niveles (a)</b>	<b>11</b>	11 niveles que corresponden al número de muestras que se tomarán, que será semanal debido a que el estiércol se recoge una vez por semana.
	<b>Niveles de Tiempo</b>	0,14,21,28,35,42,49,56,63,70,77	Día estimado para la toma de muestra.
<b>RÉPLICAS (n)</b>	<b>Número de Réplicas (n)</b>	<b>1</b>	Debido a que se dispone de un solo biodigestor
<b>VARIABLE DE RESPUESTA (b)</b>	<b>Dos: DBO<sub>5</sub> y CF</b>	<b>2</b>	
<b>NÚMERO DE EXPERIMENTOS O NÚMERO DE CORRIDAS = axn</b>		<b>11</b>	Corresponde al número de muestras.
<b>NÚMERO DE DATOS = axnxb</b>		<b>22</b>	11 de DBO <sub>5</sub> y 11 de CF.

Fuente: Elaboración propia.

Siendo la matriz del diseño experimental:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-16 Matriz del diseño experimental.

SECUENCIA DE MEDICIÓN U OBSERVACIÓN	FACTOR	VARIABLE DE RESPUESTA	
	TIEMPO DE RETENCIÓN, $t_R$ (día)	DBO <sub>5</sub>	Coliformes Fecales
1	0		
2	14		
3	21		
4	28		
5	35		
6	42		
7	49		
8	56		
9	63		
10	70		
11	77		

Fuente: Elaboración propia. 2014

Además de las variables respuesta DBO y CF se ha realizado otras mediciones de parámetros de control para la caracterización del estiércol, estiércol preparado y biol.

En la tabla siguiente se indican estos parámetros y su frecuencia de medición o toma de muestra para el análisis correspondiente.

Cuadro **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-3 Parámetros de control del biodigestor experimental.

PARÁMETROS	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	OBSERVACIÓN	OBJETIVO
Temperatura Ambiente, $T_{amb}$ .	Diaria.		Condiciones de operación del biodigestor.
Temperatura en entrada y salida del biodigestor experimental.	Diaria.	Un periodo dentro del tiempo de operación en estudio.	Condiciones de operación del biodigestor.
Temperatura del	Diaria.		Caracterización de

<b>PARÁMETROS</b>	<b>FRECUENCIA DE MEDICIÓN</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	<b>OBJETIVO</b>
agua, $T_a$ .			la materia prima.
Temperatura del estiércol preparado, $T_{ep}$ .	Diaria.		Caracterización de la materia prima.
Temperatura del biol, $T_b$ .	Diaria.	A partir del día que comenzó a salir biol.	Caracterización del biol y condiciones de operación del biodigestor.
pH del agua.	Diaria.		Caracterización de la materia prima.
pH del estiércol preparado.	Diaria.		Caracterización de la materia prima.
pH del biol.	Diaria.	A partir del día que comenzó a salir biol.	Caracterización del biol.
Densidad del estiércol, $\rho_e$ .	Semanal.		Caracterización de la materia prima.
Densidad del agua, $\rho_a$ .	Semanal.		Caracterización de la materia prima.
Densidad del estiércol preparado, $\rho_{ep}$ .	Semanal.		Caracterización de la materia prima.
Densidad del biol, $\rho_b$ .	Semanal.	A partir del día que comenzó a salir biol.	Caracterización del biol.
Humedad del estiércol.	Semanal.		Caracterización de la materia prima.
Sólidos Totales del estiércol preparado, $ST_{ep}$ .	Cada dos semanas.		Caracterización de la materia prima.
Sólidos Volátiles del estiércol preparado, $SV_{ep}$ .	Cada dos semanas.		Caracterización de la materia prima.
Sólidos Totales del biol, $ST_b$ .	Una.	Al finalizar el proceso.	Caracterización del biol.
Sólidos Volátiles biol, $SV_b$ .	Una.	Al finalizar el proceso.	Caracterización del biol.
Nitrógeno total del estiércol preparado, $N_{ep}$ .	Una.	A inicios del proceso.	Caracterización de la materia prima.
Fósforo total del estiércol preparado,	Una.	A inicios del proceso.	Caracterización de la materia prima.

PARÁMETROS	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	OBSERVACIÓN	OBJETIVO
$P_{ep}$ .			
Potasio total del estiércol preparado, $K_{ep}$ .	Una.	A inicios del proceso.	Caracterización de la materia prima.
Nitrógeno total del biol, $N_b$ .	Una.	Al finalizar el proceso.	Caracterización del biol.
Fósforo total del biol, $P_b$ .	Una.	Al finalizar el proceso.	Caracterización del biol.
Potasio total del biol, $K_b$ .	Una.	Al finalizar el proceso.	Caracterización del biol.

Fuente: Elaboración propia. 2014

## II.5. PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS EMPLEADOS PARA LA OBTENCIÓN DE RESULTADOS.

### II.5.1. PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.

Una vez armado el biodigestor experimental, se procedió a realizar las pruebas hidráulicas para verificar posibles fugas; y consisten en llenar de agua el biodigestor hasta un volumen de 10,535 litros que es el volumen líquido de operación.

Se dejó el biodigestor con agua durante tres días y se lo observa diariamente para verificar que no haya fugas.

También se ha movido (subido y bajado) las tuberías de entrada y de salida de biol de manera que estén niveladas para el volumen líquido de operación.

Luego se vació el agua y se midió el volumen requerido para que las tuberías de entrada y de salida estén completamente sumergidas de manera que no entre aire, pues el proceso es anaerobio.

En la medición se encontró que un volumen de al menos 3,8 litros garantiza el sello hidráulico de las tuberías de entrada y de salida.

Una vez realizado esto, se vació el biodigestor y se procedió con la primera carga al biodigestor.



## II.5.2. OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.

### II.5.2.1. MATERIAL Y EQUIPO UTILIZADO EN LA OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.

Se han utilizado los siguientes materiales y equipos para la operación y seguimiento del biodigestor:

- Balanza analítica.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-31**  
Balanza analítica.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

- pHmetro.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-32**  
pHmetro.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

- Balanza de humedad.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-33  
Balanza de humedad.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

- Termómetro.
- 2 vasos de precipitado de 400 ml.
- Probetas de 50, 100, 10000 ml.
- Varillas de vidrio.

- Cuchara
- Guantes de goma.
- Guantes de látex.
- Barbijo.
- Papel de cocina.

### II.5.2.2. CÁLCULO Y PREPARACIÓN DE LA PRIMERA CARGA: ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO.

La primera carga se realizó con un volumen de estiércol preparado de 18 días de carga:

$$E = 215 \frac{cm^3}{día}$$

$$V = 18 \times 215 cm^3 = 3870 cm^3$$

Este volumen es mayor al volumen de 3,8 litros medido anteriormente de manera que se garantiza el sello hidráulico de las tuberías.

Con la relación agua/estiércol de 4/1 tenemos que:

$$V = V_a + V_e = 4V_e + V_e = 5V_e$$

$$V_e = \frac{V}{5} = \frac{3870}{5} cm^3 = 774 cm^3 = 0,7740 l$$

$$V_a = 4 \times 774 cm^3 = 3096 cm^3 = 3,0960 l$$

Para efectos prácticos y debido a que la densidad del estiércol es cercana a la unidad (0,9538 g/cm<sup>3</sup> aproximadamente) se asume que la densidad es igual a 1.

De manera que la primera carga de estiércol preparado alimentado al biodigestor se preparó con:

$$m_e = 774 g \text{ mezclado con } V_a = 3096 cm^3$$

De la siguiente manera:

- En un balde pequeño se pesó los 774 g de estiércol.
- Se midió los 3096 cm<sup>3</sup> de agua en probetas de 1000 y 100 ml y se echó poco a poco en el balde removiendo cada vez para disolver el estiércol.
- Se revolvió con varilla de vidrio constantemente para obtener una mezcla homogénea, pues los sólidos del estiércol se asientan rápidamente.
- Se cargó la mezcla al biodigestor.
- Se tapó la entrada para evitar mosquitos y reducir olores.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-34  
Primera carga, sellado de agua de la tubería de entrada.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

### II.5.2.3. OPERACIÓN DIARIA DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.

Equipo utilizado: Balanza analítica, vaso de precipitado de 400 ml, probeta de 100 ml, varilla de vidrio.

Siguiendo los pasos descritos en el apartado anterior se preparó la carga de alimentación diaria al biodigestor, pero con las cantidades diarias de estiércol y agua:

$$m_e = 43 \frac{g}{día}$$

$$E_a = 172 \frac{cm^3}{día}$$

Esta operación se realizó por las mañanas.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-35 Mezcla de entrada al biodigestor: Estiércol preparado.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-36 Carga del biodigestor.



Fuente: Elaboración propia.2016

Por otro lado, se revisó diariamente el contenido de agua en la válvula de seguridad (botella con agua) de manera que el nivel del agua esté en la línea marcada, esto para mantener constante la presión dentro del biodigestor.

La válvula de gas estuvo cerrada a un principio, y se fue regulando a lo largo del proceso de manera que el flujo de biogás no afecte el flujo de líquido dentro del biodigestor.

### **II.5.3. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL: TEMPERATURA AMBIENTE Y TEMPERATURA EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL BIODIGESTOR.**

#### **II.5.3.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE.**

Instrumento de medición: Termómetro de alcohol de 100 °C.

En la medición de la temperatura ambiente se utilizó un termómetro de alcohol. Se lo sujetó con el bulbo en el aire hacia abajo en posición vertical hasta que la temperatura sea constante para su lectura durante uno o dos minutos.

#### **II.5.3.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL BIODIGESTOR.**

Instrumento de medición: termómetro digital.

Se utilizó un termómetro digital debido a que éste tiene una termocupla Probé K (NiCr-NiAl) que puede introducirse por la tubería de entrada y sumergirse en el líquido, lo que no se puede lograr con el termómetro de alcohol de 100 °C por ser corto.

Se introdujo la termocupla dentro del líquido y se esperó a que se estabilice de dos a tres minutos para la lectura de la temperatura.

## II.5.4. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA: ESTIÉRCOL VACUNO Y ESTIÉRCOL PREPARADO.

### II.5.4.1. MUESTREO DE ESTIÉRCOL VACUNO.

La muestra de estiércol vacuno para la alimentación al biodigestor y los respectivos análisis se recogió una vez a la semana, sirviendo ésta para la alimentación al biodigestor durante la semana. Se realizó de esta manera debido a la ubicación del establo.

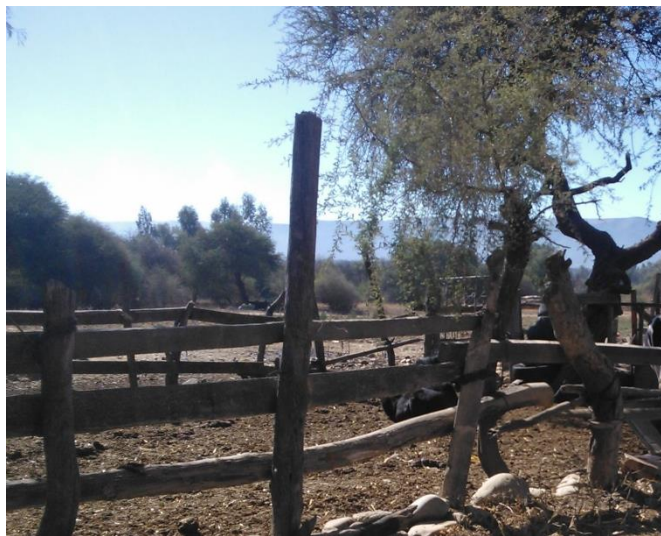
La muestra de estiércol se recogió los días lunes o martes por la mañana alrededor de las 9 am.

En el establo el estiércol está distribuido en cualquier lugar, por lo que se tomó la muestra de dos puntos y que luego se mezcló para homogenizarlos.

La cantidad de muestra que se recogía fue de aproximadamente 800 g – 1000 g.

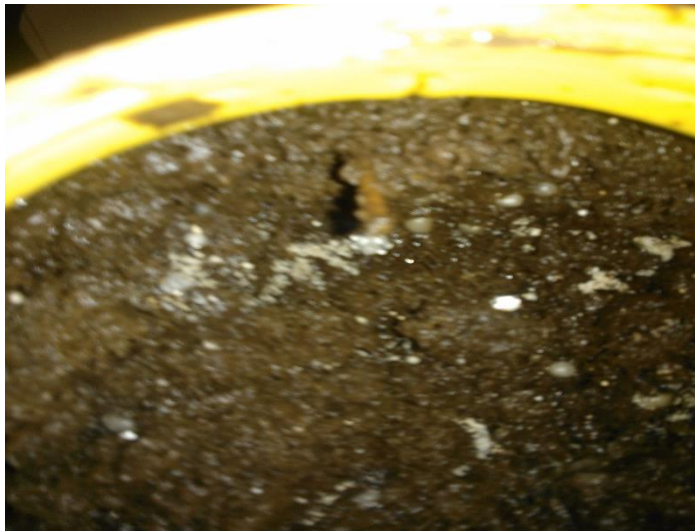
Para la recolección se utilizaron guantes de látex, una botella de plástico de 1 litro cortada a modo de pala, y se tomaron las muestras en tres bolsas plásticas para evitar cualquier fuga y olores en el traslado y almacenamiento de la muestra.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-37 Lugar de obtención y muestreo de materia prima.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-38**  
Muestra de estiércol vacuno.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

#### **II.5.4.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL ESTIÉRCOL VACUNO.**

##### **II.5.4.2.1. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL ESTIÉRCOL VACUNO.**

Equipo utilizado: probeta de 50 ml, balanza analítica.

La densidad del estiércol fue medida indirectamente por desplazamiento de volumen de líquido con una probeta de 50 ml.

Primero se midió un volumen conocido de agua, por lo general 10 ml en la probeta y se llevó a balanza analítica poniendo a cero.

Posteriormente se introdujo aproximadamente una cucharilla de estiércol, se pesó en la balanza y se midió el volumen desplazado de agua por el estiércol.

Con las lecturas de masa y volumen de estiércol se determinó la densidad como sigue:

$$\rho_e = \frac{m_e}{V_e} \quad (2 - 5)$$



#### **II.5.4.2.2. MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL ESTIÉRCOL VACUNO.**

Equipo utilizado: balanza de humedad.

La medición de la humedad del estiércol vacuno se realizó directamente en una balanza de humedad a 105 °C. Para ello se pesaron 5 g de muestra, se colocó el platillo en la balanza, se taró y luego se colocó el estiércol en el platillo con mucho cuidado y se apretó el botón inicio. El tiempo que tarda en arrojar resultado varía de acuerdo a la humedad de la muestra y de la homogeneidad con la que está distribuida en el platillo; una vez terminado el análisis (la balanza suena señalando el fin del análisis) se registró el resultado en % L/R.

#### **II.5.4.3. MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL AGUA DE MEZCLA DE ESTIÉRCOL PREPARADO.**

##### **II.5.4.3.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA.**

Instrumento de medición: Termómetro de alcohol de 100 °C.

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro de alcohol de 100 °C. Se introdujo el bulbo dentro del líquido y se esperó a que se estabilice de dos a tres minutos para la lectura de la temperatura.

##### **II.5.4.3.2. MEDICIÓN DEL pH DEL AGUA.**

Instrumento de medición: pH-metro,

La medición del pH se realizó con un pH-metro (método potenciométrico). Se introdujo el electrodo en el líquido hasta que el valor indicado en la pantalla sea constante, de uno a tres minutos y se registró el valor del pH. Se realizó la misma operación con el agua y con el estiércol preparado.

#### **II.5.4.4. MEDICIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.**

##### **II.5.4.4.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.**

Instrumento de medición: Termómetro de alcohol de 100 °C.

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro de alcohol de 100 °C. Se introdujo el bulbo dentro del líquido y se esperó a que se establezca de dos a tres minutos para la lectura de la temperatura.

##### **II.5.4.4.2. MEDICIÓN DEL pH DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.**

Instrumento de medición: pH-metro,

La medición del pH se realizó con un pH-metro (método potenciométrico). Se introdujo el electrodo en el líquido hasta que el valor indicado en la pantalla sea constante, de uno a tres minutos y se registró el valor del pH. Se realizó la misma operación con el agua y con el estiércol preparado.

##### **II.5.4.4.3. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.**

Equipo utilizado: probeta de 20 ml, balanza analítica.

Se pesó la probeta de 50 ml en una balanza analítica y se llevó a cero, luego se midió un volumen conocido de estiércol preparado (de 10 a 15 ml) y se pesó, se registró la masa y el volumen para calcular la densidad del estiércol preparado como sigue:

$$\rho_{ep} = \frac{m_{ep}}{V_{ep}} \quad (2 - 6)$$

##### **II.5.4.4.4. TOMA DE MUESTRA DEL ESTIÉRCOL PREPARADO PARA ANÁLISIS EN EL CEANID.**

Equipo utilizado: vaso precipitado de 400 ml, varilla de vidrio, balanza analítica.

La muestra de estiércol preparado para analizar en el CEANID, es una mezcla con el mismo volumen de la carga diaria al biodigestor experimental.

Se pesó 43 g de estiércol más 172 ml de agua, se agitó hasta disolver, luego se vació en un frasco de plástico, se rotuló como muestra de estiércol preparado, con la fecha, hora y parámetros a determinar. Luego se llevó la muestra al CEANID.

A continuación, la tabla muestra el detalle de los análisis y las fechas de toma de muestra respectivas.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-17 Registro de toma de muestra de estiércol preparado para análisis de estiércol preparado.

t, día	Fecha	pH	DBO <sub>5</sub> mg/l	CF NMP/100ml	ST mg/l	SV mg/l	N mg/l	P mg/l	K mg/l
24	11-02-16	*	*	*	*	*	*	*	*
31	18-02-16	*	*	*	*	*			
43	01-03-16	*	*	*	*	*			
56	14-03-16	*	*	*	*	*			

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-39 Muestra de estiércol preparado para análisis en el CEANID.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

## II.5.5. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO: BIOL.

### II.5.5.1. MEDICIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DE BIOL.

#### II.5.5.1.1. MEDICIÓN DE VOLUMEN DE BIOL PRODUCIDO.

Equipo utilizado: Probeta de 100 ml.

El volumen de biol producido a diario teóricamente debería ser el mismo volumen de la carga diaria de estiércol preparado, pero en la práctica se evidenció que puede variar por varios factores.

Una vez realizada la carga al biodigestor inmediatamente sale biol, el cual es recibido en una botella de plástico de 2 litros cortada como un vaso. Se espera que deje de gotear el biol de 5 a 10 minutos y se midió el volumen con probeta de 100 ml.

Se observó que seguía saliendo biol lentamente en el transcurso del día y la noche después de medir el volumen ya que, al día siguiente, a la hora de cargar nuevamente el biodigestor con el estiércol preparado, se encontraba biol en el vaso receptor. Se midió también este volumen y se vació el recipiente para medir nuevamente el biol producido.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-40 Primer día de producción de Biol, día 24.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-41 Biol almacenado de más de un día.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

#### **II.5.5.1.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL BIOL.**

Instrumento de medición: Termómetro de alcohol de 100 °C.

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro de alcohol de 100 °C. Se ha introdujo el bulbo dentro del líquido por la tubería de salida y se esperó a que se estabilice (de dos a tres minutos) para la lectura de la temperatura.

#### **II.5.5.1.3. MEDICIÓN DEL pH DEL BIOL.**

Instrumento de medición: pH-metro,

La medición del pH se realizó con un pH-metro (método potenciométrico). Se introdujo el electrodo en el líquido hasta que el valor indicado en la pantalla sea constante, de uno a tres minutos y se registró el valor. Se realizó la misma operación con el agua y con el estiércol preparado.

#### **II.5.5.1.4. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL BIOL.**

Equipo utilizado: probeta de 20 ml, balanza analítica.

Se pesó la probeta de 20 ml en la balanza analítica y se llevó a cero, luego se midió un volumen conocido de biol (de 10 a 15 ml) y se pesó, se registró la masa y el volumen para calcular la densidad del estiércol preparado como sigue:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad (2 - 7)$$

#### **II.5.5.1.5. TOMA DE MUESTRA DE BIOL PARA ANÁLISIS CEANID.**

Las muestras de biol se tomaron después de realizar la carga diaria al biodigestor, pues el volumen introducido desplaza líquido haciendo que salga el biol inmediatamente después de la carga.

Para tomar la muestra de biol en un inicio, y como el volumen de líquido en el biodigestor no sumergía la tubería de salida, entonces la válvula se mantenía cerrada para garantizar un proceso anaerobio.

Por lo que en un principio para tomar la muestra se bajó un poco la tubería para abrir la válvula, de manera que ésta quede sumergida todo el tiempo, luego se regresó la tubería a su posición. Esto se realizó con las primeras dos muestras tomadas para los análisis realizados en el CEANID.

Para las muestras posteriores no hubo necesidad de mover la tubería. Para la toma de muestra se esperó a que deje de gotear biol en la salida (5 a 10 minutos), se midió el volumen y llevó a una botella plástica de agua de 500 ml. Posteriormente se rotuló la muestra y se llevó al CEANID para que se realicen los análisis correspondientes.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-18 Registro toma de muestra para análisis de biol.

t día	FECHA	pH	DBO <sub>5</sub> mg/l	CF NMP/100ml	ST mg/l	SV mg/l	N mg/l	P mg/l	K mg/l
24	11-02-16	*	*	*					
28	15-02-16	*	*	*					
31	18-02-16	*	*	*					
35	22-02-16	*	*	*					
43	01-03-16	*	*	*					
49	07-03-16		*	*					
56	14-03-16		*	*					
80	07-04-16	*	*	*					
100	27-04-16			*					
115	12-05-16	*	*		*	*	*	*	*

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-42 Muestra de biol para análisis en el CEANID.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

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



## CAPÍTULO III.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### III.1. PRESENTACIÓN ORDENADA Y SISTEMÁTICA DE TODOS LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

##### III.1.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL: TEMPERATURA AMBIENTE Y TEMPERATURA EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL BIODIGESTOR.

La temperatura ambiente, temperatura en la entrada y en la salida del biodigestor se midieron en las mañanas con una frecuencia diaria en su mayoría, salvo días feriados, domingos e imprevistos en los que no se pudo realizar la medición, de manera que se obtuvieron los datos necesarios para sacar un promedio de dichas temperaturas.

##### III.1.1.1. TEMPERATURA AMBIENTE.

Los resultados de las mediciones de la temperatura ambiente se presentan a continuación. La temperatura se midió diariamente y en los días en los que se realizó la carga al biodigestor.

En la tabla siguiente están el tiempo de retención en días y la fecha y hora en la que se ha medido la temperatura.

Tabla ;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-19

Temperatura ambiente.

	t (día)	Fecha	HORA	T <sub>amb</sub> (°C)
1	0	18/01/2016	10:45	25,2
2	3	21/01/2016	11:43	26,0
3	4	22/01/2016	10:00	24,0
4	5	23/01/2016	09:00	22,5
5	8	26/01/2016	11:00	25,5
6	9	27/01/2016	09:45	21,2

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>HORA</b>	<b>T<sub>amb</sub> (°C)</b>
7	10	28/01/2016	09:50	22,8
8	11	29/01/2016	10:18	24,0
9	14	01/02/2016	11:50	21,2
10	15	02/02/2016	09:40	19,5
11	16	03/02/2016	09:52	20,0
12	17	04/02/2016	09:10	22,0
13	18	05/02/2016	09:10	21,8
14	19	06/02/2016	12:12	23,2
15	24	11/02/2016	11:25	24,0
16	25	12/02/2016	08:58	24,0
17	26	13/02/2016	09:25	24,7
18	28	15/02/2016	08:18	23,0
19	30	17/02/2016	09:57	24,7
20	31	18/02/2016	08:00	25,2
21	32	19/02/2016	08:44	25,0
22	35	22/02/2016	07:36	22,8
23	37	24/02/2016	08:45	22,0
24	38	25/02/2016	09:20	23,0
25	40	27/02/2016	09:09	23,2
26	42	29/02/2016	10:32	22,7
27	43	01/03/2016	09:32	22,8
28	45	03/03/2016	10:28	22,0
29	46	04/03/2016	08:28	21,0
30	47	05/03/2016	09:03	20,6
31	49	07/03/2016	09:53	20,2
32	51	09/03/2016	09:34	19,8
33	53	11/03/2016	09:36	19,6
34	54	12/03/2016	10:50	19,2
35	56	14/03/2016	09:30	19,0
36	58	16/03/2016	07:56	20,0
37	61	19/03/2016	08:30	22,5
38	63	21/03/2016	10:49	21,6
39	64	22/03/2016	09:29	20,0
40	65	23/03/2016	10:04	20,0
41	66	24/03/2016	09:51	20,0
42	70	28/03/2016	10:21	18,0

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>HORA</b>	<b>T<sub>amb</sub> (°C)</b>
43	72	30/03/2016	09:26	20,0
44	73	31/03/2016	09:59	21,3
45	77	04/04/2016	10:13	24,0
46	78	05/04/2016	10:57	24,8
47	80	07/04/2016	08:14	23,5
48	81	08/04/2016	09:17	23,0
49	82	09/04/2016	07:30	24,0
50	85	12/04/2016	10:51	22,5
51	86	13/04/2016	09:35	22,8
52	92	19/04/2016	09:39	23,0
53	93	20/04/2016	08:16	20,3
54	94	21/04/2016	08:45	19,8
55	96	23/04/2016	08:25	21,5
56	98	25/04/2016	08:08	20,0
57	100	27/04/2016	10:14	11,8
58	107	04/05/2016	09:50	15,0
59	109	06/05/2016	09:24	16,5
60	110	07/05/2016	08:36	16,0
61	113	10/05/2016	09:33	17,8
62	114	11/05/2016	09:41	17,8
63	115	12/05/2016	09:10	18,0
<b>PROMEDIO</b>				21,5

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La temperatura ambiente promedio a lo largo del tiempo de operación que abarca el estudio es de 21,5 °C.

### III.1.1.2. TEMPERATURA EN LA ENTRADA DEL BIODIGESTOR.

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones de temperatura en la entrada del biodigestor.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-20

Temperatura en la entrada del biodigestor.

	t (día)	Fecha	T <sub>ent</sub> (°C)
2	10	28/01/2016	23,4
3	14	01/02/2016	21,4
4	15	02/02/2016	20,5
5	18	05/02/2016	22,8
6	19	06/02/2016	24,8
7	24	11/02/2016	25,0
8	25	12/02/2016	26,3
9	26	13/02/2016	24,4
10	28	15/02/2016	24,5
11	30	17/02/2016	24,4
12	31	18/02/2016	26,7
13	32	19/02/2016	25,2
14	35	22/02/2016	22,3
15	37	24/02/2016	23,4
16	38	25/02/2016	23,3
17	40	27/02/2016	23,8
18	42	29/02/2016	25,2
19	43	01/03/2016	25,2
20	45	03/03/2016	22,4
21	46	04/03/2016	21,5
22	47	05/03/2016	20,4
23	49	07/03/2016	22,4
24	51	09/03/2016	21,4
25	53	11/03/2016	20,4
26	54	12/03/2016	20,0
27	56	14/03/2016	19,9
28	58	16/03/2016	21,7
29	61	19/03/2016	22,9
30	63	21/03/2016	21,8

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>T<sub>ent</sub> (°C)</b>
31	64	22/03/2016	20,9
32	65	23/03/2016	20,5
33	66	24/03/2016	20,4
34	70	28/03/2016	19,2
35	72	30/03/2016	20,7
36	73	31/03/2016	21,0
37	77	04/04/2016	23,8
38	78	05/04/2016	24,5
39	80	07/04/2016	23,5
<b>PROMEDIO</b>			22,7

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La temperatura en la entrada del biodigestor promedio fue de 22,7 °C que difiere de la temperatura ambiente, puesto que el biodigestor recibe calor por radiación a través de dos focos de 40 watt a un principio (hasta el día 18), luego de 60 watt (hasta el día 72) y al finalizar de 100 watt debido a que descendió la temperatura ambiente por cambio de estación.

### **III.1.1.3. TEMPERATURA EN LA SALIDA DEL BIODIGESTOR.**

La temperatura del biol se midió a la salida del biodigestor por lo que la temperatura del biol y la temperatura en la salida del biodigestor son las mismas. En la siguiente tabla se puede ver el tiempo de retención y la hora y fecha en las cuales se ha realizado la medición.

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-21

Temperatura en la salida del biodigestor.

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>T<sub>sal</sub> (°C)</b>
1	24	11/02/2016	12:00	34,0
2	25	12/02/2016	09:30	30,0
3	26	13/02/2016	08:45	25,0
4	28	15/02/2016	08:56	32,5
5	30	17/02/2016	10:28	35,2
6	31	18/02/2016	08:11	35,0
7	32	19/02/2016	09:15	33,2
8	35	22/02/2016	07:55	32,5
9	37	24/02/2016	08:20	32,0
10	38	25/02/2016	09:35	33,0
11	40	27/02/2016	09:45	33,0
12	42	29/02/2016	10:40	32,0
13	43	01/03/2016	09:50	35,0
14	45	03/03/2016	10:50	34,0
15	46	04/03/2016	08:45	32,0
16	47	05/03/2016	09:25	33,2
17	49	07/03/2016	10:15	35,5
18	51	09/03/2016	09:58	33,2
19	53	11/03/2016	10:00	34,5
20	54	12/03/2016	11:15	34,0
21	56	14/03/2016	10:03	32,0
22	58	16/03/2016	08:15	34,0
23	61	19/03/2016	08:45	35,0
24	63	21/03/2016	11:15	36,0
25	64	22/03/2016	10:48	34,0
26	65	23/03/2016	10:23	34,5
27	66	24/03/2016	10:07	32,0
28	70	28/03/2016	10:34	31,5
29	72	30/03/2016	09:38	32,0
30	73	31/03/2016	10:21	33,5
31	77	04/04/2016	10:28	34,0
32	78	05/04/2016	11:17	36,5
33	80	07/04/2016	08:30	36,0
34	81	08/04/2016	09:32	36,0

	t (día)	Fecha	Hora	T <sub>sal</sub> (°C)
35	82	09/04/2016	08:00	37,0
36	92	19/04/2016	10:05	28,0
37	93	20/04/2016	08:32	28,0
38	94	21/04/2016	09:05	29,0
39	98	25/04/2016	08:26	31,5
40	100	27/04/2016	10:31	26,5
41	107	04/05/2016	11:46	23,0
42	110	07/05/2016	08:55	35,0
44	113	10/05/2016	09:43	38,0
45	114	11/05/2016	10:02	37,0
46	115	12/05/2016	09:24	38,5
<b>PROMEDIO</b>				33,1

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La temperatura en la salida del biodigestor promedio fue de 33,1 °C.

La siguiente tabla indica la diferencia entre las temperaturas en la entrada y en la salida del biodigestor.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-22**

Diferencia entre las temperaturas en la entrada y salida del biodigestor.

	t (día)	Fecha	T <sub>ent</sub> (°C)	T <sub>sal</sub> (°C)	Δ T
15	24	11/02/2016	25,0	34,0	9,0
16	25	12/02/2016	26,3	30,0	3,7
17	26	13/02/2016	24,4	25,0	0,6
18	28	15/02/2016	24,5	32,5	8,0
19	30	17/02/2016	24,4	35,2	10,8
20	31	18/02/2016	26,7	35,0	8,3
21	32	19/02/2016	25,2	33,2	8,0
22	35	22/02/2016	22,3	32,5	10,2
23	37	24/02/2016	23,4	32,0	8,6
24	38	25/02/2016	23,3	33,0	9,7
25	40	27/02/2016	23,8	33,0	9,2
26	42	29/02/2016	25,2	32,0	6,8

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>T<sub>ent</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>sal</sub> (°C)</b>	<b>Δ T</b>
27	43	01/03/2016	25,2	35,0	9,8
28	45	03/03/2016	22,4	34,0	11,6
29	46	04/03/2016	21,5	32,0	10,5
30	47	05/03/2016	20,4	33,2	12,8
31	49	07/03/2016	22,4	35,5	13,1
32	51	09/03/2016	21,4	33,2	11,8
33	53	11/03/2016	20,4	34,5	14,1
34	54	12/03/2016	20,0	34,0	14,0
35	56	14/03/2016	19,9	32,0	12,1
36	58	16/03/2016	21,7	34,0	12,3
37	61	19/03/2016	22,9	35,0	12,1
38	63	21/03/2016	21,8	36,0	14,2
39	64	22/03/2016	20,9	34,0	13,1
40	65	23/03/2016	20,5	34,5	14,0
41	66	24/03/2016	20,4	32,0	11,6
42	70	28/03/2016	19,2	31,5	12,3
43	72	30/03/2016	20,7	32,0	11,3
44	73	31/03/2016	21,0	33,5	12,5
45	77	04/04/2016	23,8	34,0	10,2
46	78	05/04/2016	24,5	36,5	12,0
47	80	07/04/2016	23,5	36,0	12,5
<b>PROMEDIO</b>			22,7	33,3	10,6

Fuente: Elaboración propia. 2016.

El promedio de la diferencia entre las temperaturas en la entrada y salida del biodigestor es de 10,6 °C.



### III.1.2. PROPIEDADES DE LA MATERIA PRIMA.

#### III.1.2.1. HUMEDAD Y DENSIDAD DEL ESTIÉRCOL VACUNO.

La humedad y la densidad del estiércol vacuno se han medido por las mañanas con una frecuencia aproximada de una vez por semana. En la tabla siguiente se muestran los resultados de las mediciones y las fechas en las que se realizaron.

Tabla ;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-23

Humedad y densidad del estiércol vacuno.

	t (día)	Fecha	$\rho_e$ (g/ml)	Hm <sub>e</sub> (%L)
1	5	23/01/2016	0,9730	84,21
2	14	01/02/2016	0,9725	83,58
3	19	06/02/2016	0,9719	81,79
4	26	13/02/2016	0,9751	82,94
5	32	19/02/2016	0,9813	81,38
6	40	27/02/2016	0,9597	84,49
7	45	03/03/2016	0,9749	82,43
8	51	09/03/2016	0,9625	84,84
9	58	16/03/2016	0,9677	85,85
10	66	24/03/2016	0,9857	83,52
11	73	31/03/2016	0,9640	82,25
12	80	07/04/2016	0,9879	84,48
13	92	19/04/2016	0,9690	84,61
14	96	23/04/2016	0,9672	85,23
15	107	04/05/2016	0,9792	85,46
<b>PROMEDIO</b>			0,9728	83,80

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Siendo la densidad promedio 0.9728 g/ml y la humedad de 83.80 %L.

### III.1.2.2. TEMPERATURA Y pH DEL AGUA.

Los resultados de las mediciones de temperatura y pH del agua utilizada para la mezcla de alimentación del biodigestor se muestran en la siguiente tabla además de las fechas en las cuales se midieron. Las mediciones se realizaron previas a la carga del biodigestor antes de preparar la mezcla.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-24**

Temperatura y pH del agua.

	t (día)	Fecha	T (°C)	pH
1	3	21/01/2016	23,0	
2	5	23/01/2016	22,8	7,37
3	8	26/01/2016	25,0	7,70
4	9	27/01/2016	22,0	8,00
5	10	28/01/2016	23,2	7,69
6	11	29/01/2016	23,5	7,95
7	14	01/02/2016	20,5	8,00
8	15	02/02/2016	21,0	7,90
9	16	03/02/2016	20,5	7,50
10	17	04/02/2016	21,5	7,20
11	18	05/02/2016	21,5	7,40
12	19	06/02/2016	23,0	7,46
13	24	11/02/2016	23,5	7,65
14	25	12/02/2016	22,5	7,64
15	26	13/02/2016	23,8	7,40
16	28	15/02/2016	23,0	7,76
17	30	17/02/2016	24,0	7,60
18	31	18/02/2016	25,0	7,56
19	32	19/02/2016	24,8	7,60
20	35	22/02/2016	22,0	7,60
21	37	24/02/2016	22,5	7,58
22	38	25/02/2016	23,0	7,88
23	40	27/02/2016	23,2	7,50
24	42	29/02/2016	23,0	7,74
25	43	01/03/2016	22,5	6,75

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>T (°C)</b>	<b>pH</b>
26	45	03/03/2016	22,2	7,49
27	46	04/03/2016	21,0	7,85
28	47	05/03/2016	21,4	6,85
29	49	07/03/2016	20,8	7,64
30	51	09/03/2016	21,2	7,81
31	53	11/03/2016	20,0	7,92
32	56	14/03/2016	18,8	7,99
33	58	16/03/2016	20,8	7,80
34	61	19/03/2016	23,0	7,80
35	63	21/03/2016	21,0	8,05
36	64	22/03/2016	20,8	8,00
37	65	23/03/2016	21,0	8,16
38	66	24/03/2016	20,0	7,57
39	70	28/03/2016	19,0	7,95
40	72	30/03/2016	20,0	8,00
41	77	04/04/2016	24,0	8,10
42	78	05/04/2016	23,2	8,10
43	80	07/04/2016	23,2	8,26
44	81	08/04/2016	23,0	8,01
45	82	09/04/2016	23,0	7,69
46	92	19/04/2016	24,0	8,33
47	107	04/05/2016	15,0	8,15
48	109	06/05/2016	16,0	8,68
<b>PROMEDIO</b>			21,9	7,76

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Siendo la temperatura promedio del agua utilizada para el estiércol preparado de 21,9 °C y el pH de 7,76.

### **III.1.2.3. TEMPERATURA Y pH DEL ESTIÉRCOL PREPARADO.**

En el estiércol preparado se midieron la temperatura y pH antes de realizar la carga al biodigestor. A continuación, se muestran los resultados y la fecha en las cuales se

realizaron las mediciones, además de la hora en la que se realizó la carga al biodigestor.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-25**

Temperatura, pH y densidad del estiércol preparado.

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>T (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>Hora de carga</b>
1	4	22/01/2016	23,0		11:50
2	5	23/01/2016	22,8	6,93	09:30
3	8	26/01/2016	25,2	7,82	11:15
4	9	27/01/2016	22,8	7,95	10:50
5	10	28/01/2016		8,11	10:15
6	11	29/01/2016	24,0	7,90	10:30
7	14	01/02/2016	21,0	8,28	12:10
8	15	02/02/2016	21,0	7,62	09:50
9	16	03/02/2016	21,0	7,95	10:05
10	17	04/02/2016	22,0	7,50	09:41
11	18	05/02/2016	22,0	7,60	09:25
12	19	06/02/2016	23,5	7,58	12:25
13	24	11/02/2016	23,5	7,77	11:55
14	25	12/02/2016	23,5	7,74	09:15
15	26	13/02/2016	23,5	7,88	10:40
16	28	15/02/2016	23,0	7,55	08:45
17	30	17/02/2016	24,0	7,40	10:16
18	31	18/02/2016	25,0	7,44	08:10
19	32	19/02/2016	25,0	7,70	09:10
20	35	22/02/2016	22,0	7,62	07:50
21	37	24/02/2016	22,8	7,61	10:20
22	38	25/02/2016	23,0	7,90	09:42
23	40	27/02/2016	23,2	7,82	09:33
24	42	29/02/2016	23,0	8,07	10:50
25	43	01/03/2016	22,8	7,66	09:40
26	45	03/03/2016	22,3	7,92	10:57
27	46	04/03/2016	21,0	8,12	08:43
28	47	05/03/2016	21,2	7,93	09:20
29	49	07/03/2016	21,0	7,76	10:10

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>T (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>Hora de carga</b>
30	51	09/03/2016	21,0	7,98	09:48
31	53	11/03/2016	19,8	7,80	09:55
32	56	14/03/2016	19,8	7,95	10:00
33	58	16/03/2016	20,8	7,86	08:13
34	61	19/03/2016	22,3	8,30	08:45
35	63	21/03/2016	21,2	7,84	11:02
36	64	22/03/2016	21,0	7,83	09:45
37	65	23/03/2016	21,0	7,84	10:20
38	70	28/03/2016	19,0	7,90	10:30
39	77	04/04/2016	24,0	7,79	10:32
40	78	05/04/2016	24,0	7,72	11:15
41	80	07/04/2016	23,2	7,99	08:27
42	81	08/04/2016	23,2	7,95	09:29
43	82	09/04/2016	23,0	8,12	07:44
44	92	19/04/2016	23,0	7,54	10:01
45	98	25/04/2016	20,5	8,00	08:21
46	107	04/05/2016	15,2	7,90	10:07
47	109	06/05/2016	16,2	7,80	09:40
48	113	10/05/2016	17,8		09:40
<b>PROMEDIO</b>			22,0	7,81	09:55

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La temperatura promedio es de 22 °C y el pH promedio de 7,81.

#### **III.1.2.4. RESULTADO DE ANÁLISIS DE ESTIÉRCOL PREPARADO.**

Los resultados de análisis realizados en el CEANID y las fechas en las cuales se tomaron las muestras a continuación.

Tabla ;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-26

Resultados de análisis del estiércol preparado.

t (día)	FECHA	Coliformes Fecales (NMP/100ml)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	pH	T (pH)	ST (mg/l)	SV (mg/l)
24	11/02/16	2,10E+06	7504	7,31	20,2	30149	2486
31	18/02/16	2,40E+09	5600	7,7	19,2	25232	4083,4
43	01/03/16	1,10E+10	4379	7,82	11,5	22643	14669
56	14/03/16	4,30E+09	3525	8,06	19	15951	11121
<b>PROMEDIO</b>		4,43E+09	5252	7,72		23493,75	8089,85

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Tabla ;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-27

Resultados de análisis de N, P y K total del estiércol preparado.

t (día)	FECHA	P (mg/l)	N (mg/l)	K (mg/l)
24	11/02/16	113	547,8	484,6

Fuente: Elaboración propia. 2016.

### III.1.3. PROPIEDADES DEL PRODUCTO BIOL.

#### III.1.3.1. VOLUMEN, TEMPERATURA, pH Y DENSIDAD DEL BIOL.

En la siguiente tabla se encuentra el volumen de biol producido, la temperatura del biol, medida en la salida del biodigestor, el pH y la densidad, con las fechas de las mediciones y el tiempo de retención.

Tabla ;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-28

Volumen, temperatura, pH y densidad del biol.

	t (día)	Fecha	V <sub>b</sub> (ml)	T <sub>b</sub> (°C)	pH	ρ <sub>e</sub> (g/ml)
1	24	11/02/2016	220	34,0	7,14	0,9866
2	25	12/02/2016	50	30,0	7,18	
3	26	13/02/2016	300	25,0	6,95	
4	28	15/02/2016	230	32,5	7,05	
5	30	17/02/2016	0	35,2		0,9718

	<b>t (día)</b>	<b>Fecha</b>	<b>V<sub>b</sub> (ml)</b>	<b>T<sub>b</sub> (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>ρ<sub>e</sub> (g/ml)</b>
6	31	18/02/2016	210	35,0	6,97	
7	32	19/02/2016	110	33,2	6,97	
8	35	22/02/2016	200	32,5	6,91	0,9677
9	40	27/02/2016	0	33,0		
10	42	29/02/2016	0	32,0		
11	43	01/03/2016	215	35,0	6,96	0,9867
12	46	04/03/2016	35	32,0	6,93	
13	47	05/03/2016		33,2		
14	49	07/03/2016	215	35,5	6,62	0,9715
15	51	09/03/2016	39	33,2	6,82	
16	53	11/03/2016	53	34,5	6,89	
17	56	14/03/2016	100	32,0	6,91	0,9572
18	63	21/03/2016	0	36,0		
19	64	22/03/2016	10	34,0	6,82	
20	65	23/03/2016	215	34,5	6,78	0,9759
21	66	24/03/2016	0	32,0		
22	70	28/03/2016	5	31,5	7,06	
23	72	30/03/2016	0	32,0		
24	73	31/03/2016		33,5	7,10	
25	77	04/04/2016	50	34,0	6,92	0,9805
26	78	05/04/2016	100	36,5	7,04	
27	80	07/04/2016	220	36,0	6,86	
28	82	09/04/2016	100	37,0	6,94	0,9796
29	86	13/04/2016	100	35,0	6,92	
30	92	19/04/2016	190	28,0	6,81	0,9854
31	93	20/04/2016	90	30,0	6,91	
32	94	21/04/2016		29,0	6,89	
33	96	23/04/2016		31,0	7,01	
34	98	25/04/2016	50	31,5	7,12	0,9602
35	100	27/04/2016	215	26,5	6,85	
36	107	04/05/2016	60	23,0	6,91	
37	109	06/05/2016	40	32,0	6,99	
38	110	07/05/2016		35,0	7,15	
39	113	10/05/2016		38,0	7,15	
40	114	11/05/2016	30	37,0	6,84	
41	115	12/05/2016	50	38,5	6,98	

t (día)	Fecha	V <sub>b</sub> (ml)	T <sub>b</sub> (°C)	pH	ρ <sub>e</sub> (g/ml)
<b>PROMEDIO</b>		100	32,9	6,95	0,9748

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La temperatura promedio es de 32,9 °C, el pH de 6,95 y la densidad promedio de 0,9748 g/ml.

### III.1.3.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE BIOL.

Las fechas de toma de muestras y los resultados de los análisis realizados por el CEANID se muestran en las tablas siguientes.

Tabla ;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-29

Resultados de análisis de biol: Coliformes fecales.

t (días)	Fecha	Coliformes Fecales (NMP/100ml)
0	18/01/2016	4,43E+09
24	11/02/2016	9,30E+05
28	15/02/2016	2,80E+03
31	18/02/2016	1,10E+07
35	22/02/2016	4,60E+06
43	01/03/2016	2,40E+07
49	07/03/2016	1,60E+06
56	14/03/2016	1,60E+07
65	23/03/2016	2,10E+06
80	07/04/2016	2,40E+03
100	27/04/2016	2,10E+05

Fuente: Elaboración propia. 2016.



Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-30

Resultados de análisis de biol: DBO<sub>5</sub>.

t (días)	Fecha	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
0	18/01/2016	5252
24	11/02/2016	3645
28	15/02/2016	3725
31	18/02/2016	2050
35	22/02/2016	2215
43	01/03/2016	1290
49	07/03/2016	537
56	14/03/2016	585
65	23/03/2016	583
80	07/04/2016	495
115	12/05/2016	449

Fuente: Elaboración Propia. 2016

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-31

Resultados de análisis de biol: pH.

t (días)	Fecha	pH	T (pH)
24	11/02/2016	7,44	22,2
28	15/02/2016	7,96	25,5
31	18/02/2016	7,93	21,7
35	22/02/2016	7,51	21,1
43	01/03/2016	7,46	11,6
80	07/04/2016	7,74	28,8
115	12/05/2016	7,94	21
<b>PROMEDIO</b>		7,67	

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-32

Resultados de análisis de biol: ST, SV, N, P y K.

t (días)	Fecha	ST (mg/l)	SV (mg/l)	P (mg/l)	N (mg/l)	K (mg/l)
115	12/05/2016	3520	2630	24,9	187	255

Fuente: Elaboración propia.2016.

El promedio del valor del pH de biol es de 7,67.

Los resultados de los análisis de biol mostrados se realizaron en el CEANID y los gastos de dichos análisis fueron cubiertos por la Red de Apoyo al Sector Productivo de Tarija (RASP).

### III.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

#### III.2.1. DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR DE POLIETILENO TUBULAR.

Las condiciones de operación determinadas a través del promedio de todas las mediciones realizadas son: la temperatura ambiente, la temperatura en la entrada del biodigestor, temperatura en la salida y la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del biodigestor. Las mismas se muestran en la tabla siguiente, además de los valores mínimo y máximo, de la mediana o valor central, la moda o valor que se repite más veces y la varianza muestral.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-33

Condiciones de operación del biodigestor de polietileno tubular.

<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR</b>				
	<b>T<sub>amb</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>ent</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>sal</sub> (°C)</b>	<b>ΔT (°C)</b>
PROMEDIO	21,5	22,7	33,3	10,6
MINIMO	11,8	19,2	25,0	5,8
MÁXIMO	26,0	26,7	36,5	9,8
MEDIANA	22,0	22,4	33,5	11,1
MODA	20	25,2	34	8,8
VARIANZA	7,4855	4,1472	4,4508	0,3036

Fuente. Elaboración propia. 2016.

Los resultados mostrados se calcularon en hoja de cálculo de Excel. En cuanto a la temperatura ambiente, el promedio a lo largo del proceso es de 21,5 °C registrándose una mínima de 11,8 °C y una máxima de 26 °C, siendo la temperatura que más se ha

repetido la de 20 °C teniendo una varianza de 7,4855. De la misma manera en la tabla anterior se pueden ver las temperaturas en la entrada y salida y su diferencia.

Las temperaturas en la entrada y en la salida del biodigestor son mayores a la temperatura ambiente, esto debido a la calefacción otorgada por radiación a través de los dos focos ubicados encima del biodigestor. A pesar de esto la temperatura del biodigestor sigue siendo afectada por la temperatura ambiente ya que no está completamente aislado y no es uniforme dentro del biodigestor ya, pues es un biodigestor tubular.

A lo largo del biodigestor la temperatura aumenta siendo mayor en la salida con 33,3 °C que, en la entrada de 22,7 °C. La diferencia entre la entrada y salida es de 10,6 °C en promedio debido a la actividad microbiana, ya que en la entrada hay más alimento que microorganismos, mientras que a medida que se avanza hacia la salida, la cantidad de microorganismo es mayor.

Se puede decir que el biodigestor opera a una temperatura que es el promedio entre la temperatura en la entrada y la temperatura en la salida:

$$T_{BDG} = \frac{22,7 + 33,3}{2} \text{ °C} = 28 \text{ °C}$$

*T<sub>BDG</sub> = Temperatura de operación promedio del biodigestor.*

Siendo la temperatura de operación promedio del biodigestor de 28 °C, la cual es una temperatura mesófila. Pero como se mencionó no es constante, ya que depende de la temperatura ambiente y no es uniforme en su interior.

### **III.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.**

Las propiedades de las materias primas se han determinado a través del promedio de las mediciones realizadas durante el tiempo de retención estudiado.

En el estiércol las propiedades fisicoquímicas que se han determinado son la humedad y la densidad. En la tabla siguiente se puede ver además el valor mínimo, máximo, mediana, moda y la varianza de cada uno.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-34

Propiedades del estiércol vacuno.

<b>PROPIEDADES DEL ESTIÉRCOL VACUNO</b>		
	<b><math>\rho_e</math></b>	<b><math>Hm_e</math></b>
PROMEDIO	0,9728	83,80
MÍNIMO	0,9597	81,38
MÁXIMO	0,9879	85,85
MEDIANA	0,9725	84,21
VARIANZA MUESTRAL	6,7461E-05	1,9207

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La densidad del estiércol vacuno es de 0,9728 g/ml y la humedad de 83,80 %L (porcentaje de líquido en peso).

Se determinaron además la temperatura y el pH del agua utilizada para mezclar con el estiércol y preparar la mezcla de entrada al biodigestor. Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-35

Propiedades del agua.

<b>PROPIEDADES DEL AGUA</b>		
	<b><math>T_a</math></b>	<b>pH</b>
PROMEDIO	21,9	7,76
MÍNIMO	15,0	6,75
MÁXIMO	25,0	8,68
MEDIANA	22,5	7,76
MODA	23	8
VARIANZA MUESTRAL	4,0660	0,1229

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La temperatura del agua utilizada para la mezcla es de 21,9 °C registrándose una temperatura mínima de 15 °C y una máxima de 25 °C durante el tiempo de retención estudiado.

El estiércol preparado es un líquido con alto contenido de sólidos que se ven a simple vista en un vaso, pues sedimentan con rapidez, tiene el olor característico del estiércol vacuno. Y color marrón oscuro igual al del estiércol.

Las propiedades determinadas de la mezcla de entrada al biodigestor son la temperatura y el pH justo antes de realizar la carga respectiva. Estos resultados se muestran en la siguiente tabla además de los valores mínimo, máximo, la mediana, la moda y la varianza.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-36**

Propiedades del estiércol preparado.

<b>ESTIÉRCOL PREPARADO</b>						
	<b>T</b>	<b>pH</b>	<b>ST (mg/l)</b>	<b>SV (mg/l)</b>	<b>CF (NMP/100ml)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>
PROMEDIO	22,0	7,81	23493,75	8089,85	4,43E+09	5252
MÍNIMO	15,2	6,93	15951	2486	2,10E+06	3525
MÁXIMO	25,2	8,30	30149	14669	1,10E+10	7504
MEDIANA	22,8	7,84	2,39E+04	7,60E+03	3,35E+09	4,99E+03
MODA	21	7,95	-	-	-	-
VARIANZA MUESTRAL	4,2493	0,0585	34976906	33309287	2,23E+19	2979088,7

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-37**

Propiedades del estiércol preparado: N, P y K.

<b>P (mg/l)</b>	<b>N (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>
113	547,8	484,6

Fuente: Elaboración propia. 2016.

La temperatura media del estiércol preparado es de 22 °C y el pH es básico con una media de 7,81. El promedio del pH medido por el CEANID es de 7,72, cercano al medido en el laboratorio.

La temperatura del estiércol preparado es inferior a la temperatura en la entrada del biodigestor con 0,7 °C, lo cual indica que en cada carga disminuye poco la temperatura en el biodigestor hasta alcanzarse el equilibrio

Los valores de Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Coliformes Fecales, Demanda Bioquímica de Oxígeno son un promedio de cuatro valores. El contenido de Fósforo, Nitrógeno y Potasio son resultados de un solo análisis debido a que no son propiedades determinantes, sólo de referencia.

Como se observa, las características fisicoquímicas del estiércol preparado pueden variar mucho de un estiércol a otro al igual que las características microbiológicas como el contenido de coliformes fecales. Esto depende mucho si el estiércol es del mismo animal, de cómo se recoja la muestra, pues no siempre es posible obtener una muestra de estiércol sin tierra tratándose de un corral de tierra. Además, no es lo mismo recoger la muestra un día soleado, o tras una lluvia; depende también de qué tan fresco es el estiércol.

La muestra de estiércol con el valor máximo de sólidos totales y de demanda bioquímica de oxígeno, es la misma que da como resultado un mínimo de coliformes fecales y sólidos volátiles. Esta muestra se recogió tras una lluvia; esto indica que la lluvia arrastró bacterias coliformes fuera del estiércol, pero al mismo tiempo hizo que aumentara los sólidos totales posiblemente por arrastre de tierra.

Los valores de sólidos totales, coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno del estiércol preparado de la Tabla III-18 sobrepasan los límites máximos admisibles según la ley del medio ambiente N° 1333; de manera que, no es adecuado su uso como fertilizante.

### **III.2.3. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO BIOL.**

El biol tiene baja concentración de sólidos pues a la vista se ve como un líquido homogéneo, su color peculiar puede ser igual o más claro que el estiércol preparado y no tiene el olor característico del estiércol y no es desagradable.

En el biol se han determinado las siguientes propiedades fisicoquímicas: temperatura, pH y densidad; las mismas se muestran en la tabla a continuación y también el volumen promedio de biol producido. Además de los valores mínimo, máximo, la mediana y la varianza de las propiedades fisicoquímicas.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-38**

Propiedades del biol.

<b>BIOL</b>				
	<b>V (ml)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>ρ (g/ml)</b>
PROMEDIO	100	32,9	6,95	0,9748
MÍNIMO	5	23	6,62	0,9572
MÁXIMO	300	38,5	7,18	0,9867
MEDIANA	100	33,2	6,935	0,9759
VARIANZA MUESTRAL	50	10,8094	0,0150	0,0001

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-39**

Propiedades del biol: CF, ST, SV, N, P Y K.

<b>CF (NMP/100ml)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>ST (mg/l)</b>	<b>SV (mg/l)</b>	<b>P (mg/l)</b>	<b>N (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>
2,40E+03	472	3520	2630	24,9	187	255

Fuente: Elaboración propia. 2016.

El promedio del volumen de biol obtenido después de la carga diaria es de 100 ml, excluyendo los días en los que no salió biol. El volumen de biol obtenido tras la carga diaria del biodigestor, si bien en teoría debería salir el mismo volumen de líquido que ingresa, en la práctica no es así. Había días en los que salía un volumen menor al teórico de 215 ml, pero al día siguiente se encontraba en el vaso receptor biol que salió en el transcurso del día y la noche, el volumen de este biol era aproximadamente el faltante del día anterior. Por lo que el volumen de operación del biodigestor se mantenía prácticamente constante (fuera de imprevistos derrames).

El biodigestor comenzó a producir en un tiempo de retención igual a 24, pero la cantidad que salía no era constante (como se puede ver en el registro de la Tabla III-

9) habiendo días en los que apenas goteaba biol tras la carga y otros días en los que por descompensación por la presión interna se derramó biol del vaso receptor.

En una ocasión se encontró aproximadamente 630 ml de biol que habían salido en el transcurso del fin de semana, otra en la que se encontró aproximadamente 800 ml de biol. Ambos derrames de biol ocurrieron tras dejar la válvula de salida del biogás cerrada; al no haber una salida de gas aumenta la presión interna desplazando al líquido del interior, a pesar de la válvula de seguridad. Hubo otras situaciones similares donde se encontró volúmenes de biol de 400 ml, 375 y 500 ml aproximadamente. Después de dichos incidentes la producción de biol se vio afectada, ya que el biodigestor dejó de estar con el volumen líquido de operación, por lo que dejó de producir biol o salía en muy pequeñas cantidades.

Como se puede ver en la tabla anterior, la temperatura del biol producido es de 32,9 °C, pH de 6,95 lo cual indica que es un poco ácido y una densidad de 0,9748 g/ml. El pH medido por el CEANID es básico de 7,67, hay una diferencia de 0,72 que puede atribuirse a que el pH medido por el CEANID no se realizó en el biol fresco sino varios días después de tomada la muestra (en ocasiones hasta una semana después).

En el caso de los coliformes fecales, se ha visto que a pesar de reducir puede volver a aumentar de manera que se toma el último valor más bajo de 2,40E+03 NMP/100ml de todas las muestras a lo largo del tiempo estudiado.

Para la demanda bioquímica de oxígeno se tiene un valor más bajo de 495 mg/l. Se hizo un análisis posterior a éste dando un resultado cercano de 449 mg/l, es decir que ya se tenía una producción estable de manera que la DBO<sub>5</sub> del biol es el promedio de estos dos últimos valores obtenidos.

$$DBO_{5b} = \frac{495 + 449 \text{ mg}}{2} \frac{\text{mg}}{\text{l}} = 472 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

Para el contenido de Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Fósforo Nitrógeno y Potasio en el biol se realizó un solo análisis al finalizar cuando ya se tenía una producción estable y constante, es decir con valores de DBO<sub>5</sub> y CF constantes o cercanos.



### III.2.4. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, COLIFORMES FECALES, SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES.

Los valores iniciales corresponden al estiércol preparado (Tabla III-18) y los valores finales corresponden al biol obtenido (Tabla III-21).

En el biol se realizó un análisis de Sólidos Totales y uno de Sólidos Volátiles al final del proceso cuando ya se obtenía un producto constante.

Siendo los valores iniciales de estiércol preparado y los valores finales del biol los siguientes:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-40  
Coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales y sólidos volátiles del estiércol preparado y del biol.

MUESTRA	Coliformes Fecales, CF (NMP/100ml)	Demanda bioquímica de oxígeno, DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Sólidos totales, ST (mg/l)	Sólidos volátiles, SV (mg/l)
ESTIÉRCOL PREPARADO	4,43E+09	5252	23493,75	8089,85
BIOL	2,10E+05	472	3520	2630

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Cálculo de la eficiencia de remoción de coliformes fecales:

$$\% \eta = \frac{\text{valor inicial} - \text{valor final}}{\text{valor inicial}} \times 100 \quad (3 - 1)$$

$$\% \eta_{CF} = \frac{CF_{ep} - CF_b}{CF_{ep}} \times 100 \quad (3 - 2)$$

$$\% \eta_{CF} = \frac{4,43 \times 10^9 - 2,1 \times 10^5}{4,43 \times 10^9} \times 100$$

$$\% \eta_{CF} = 99,9953$$

Cálculo de la eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno:

$$\% \eta_{DBO_5} = \frac{DBO_{5ep} - DBO_{5b}}{DBO_{5ep}} \times 100 \quad (3 - 3)$$

$$\% \eta_{DBO_5} = \frac{5252 - 472}{5252} \times 100$$

$$\% \eta_{DBO_5} = 91,0129$$

Cálculo de la eficiencia de remoción de los sólidos totales:

$$\% \eta_{ST} = \frac{ST_{ep} - ST_b}{ST_{ep}} \times 100 \quad (3 - 4)$$

$$\% \eta_{ST} = \frac{23493,75 - 3520}{23493,75} \times 100$$

$$\% \eta_{ST} = 85,0173$$

Cálculo de la eficiencia de remoción de los sólidos volátiles:

$$\% \eta_{SV} = \frac{SV_{ep} - SV_b}{SV_{ep}} \times 100 \quad (3 - 5)$$

$$\% \eta_{SV} = \frac{8089,85 - 2630}{8089,85} \times 100$$

$$\% \eta_{SV} = 67,4901$$

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-41**  
 Eficiencia de remoción de Coliformes fecales, Demanda bioquímica de oxígeno,  
 Sólidos totales y Sólidos volátiles.

	<b>Coliformes Fecales, CF</b>	<b>Demanda bioquímica de oxígeno, DBO<sub>5</sub></b>	<b>Sólidos totales, ST</b>	<b>Sólidos volátiles, SV</b>
%η	99,9953	91,0129	85,0173	67,4901

Fuente: Elaboración propia. 2016

En la tabla se puede ver los resultados de las eficiencias de remoción de CF, DBO<sub>5</sub>, ST y SV del proceso de digestión anaerobia del biodigestor experimental.

### **III.2.5. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL CONTENIDO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO TOTAL.**

De la misma forma se determina la eficiencia de remoción del nitrógeno, fósforo y potasio total, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-42**  
Eficiencia de remoción de Nitrógeno, Fósforo y Potasio Total.

	<b>P (mg/l)</b>	<b>N (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>
ESTIÉRCOL PREPARADO	113	547,8	484,6
BIOL	24,9	187	255
%η	77,9646	65,8635	47,3793

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Las disminuciones de los nutrientes fósforo, nitrógeno y potasio son atribuidas a la acumulación de sólidos en el biodigestor.

### **III.2.6. DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL BIODIGESTOR.**

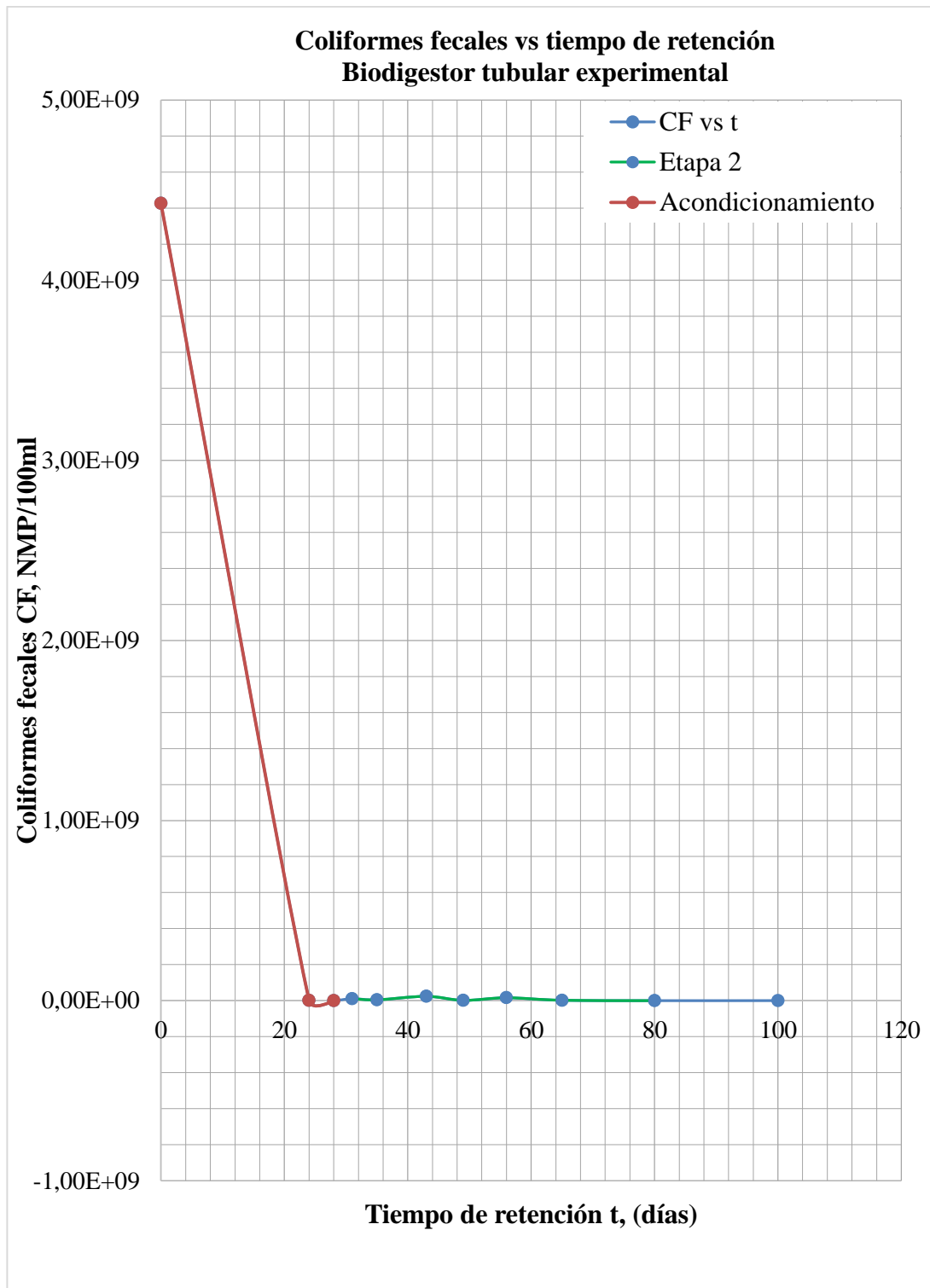
#### **III.2.6.1. DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE LA VARIACIÓN DE COLIFORMES FECALES CF.**

En la operación del biodigestor experimental se ha visto que la concentración de coliformes fecales del producto líquido tuvo una disminución rápida a un inicio, y luego de volver a subir, disminuyó lentamente (Figura III-1).

De manera que se diferencian dos etapas en el proceso para la variación de los coliformes fecales: la primera de disminución rápida, denominada etapa de acondicionamiento, y la segunda etapa con una disminución lenta.

A continuación, se gráfica los coliformes fecales CF en función del tiempo de retención  $t$ , a partir de los datos de la Tala III-11.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-43 Gráfica de Coliformes fecales CF en función del tiempo de retención  $t$ .



Fuente: Elaboración propia. 2016.

Al inicio de la primera etapa de acondicionamiento no se había alcanzado aún el volumen líquido de operación, alcanzándose éste el día 23, con lo cual el día 24 empezó a salir producto líquido del biodigestor.

La disminución rápida de coliformes fecales de la primera etapa se atribuye a que en un inicio el volumen líquido en el biodigestor era de 3,8 litros y se fue llenando con la carga diaria al biodigestor hasta el volumen de operación de 10,535 litros alcanzado el día 23.

Durante este tiempo la válvula de salida estuvo cerrada, y el flujo no es el mismo que si estuviese abierta, pues estando cerrada no hay un flujo entre el punto de entrada y salida, teniéndose un sistema semiestacionario hasta que se llega a completar el volumen para su funcionamiento al 100 %; más si una mezcla cerca del punto de entrada. De manera que no llega alimento y microorganismos a todo el volumen del biodigestor, siendo éstas las causas de la disminución rápida de coliformes fecales en el producto líquido del biodigestor.

La disminución lenta de la segunda etapa es atribuible a que los coliformes fecales son bacterias que tienen preferencia por medios líquidos de manera que circulan con el líquido recorriendo el camino más corto entre la entrada y salida del biodigestor de manera que el producto líquido tiene una cantidad de coliformes fecales importante siendo su disminución más lenta.

De manera que, para describir la variación de coliformes fecales durante el proceso de descomposición en el biodigestor experimental, se calcula dos cinéticas: una para la etapa de acondicionamiento y otra para la segunda etapa de disminución lenta.

La velocidad de variación de coliformes fecales en función del tiempo de retención es igual a (ecuación I-9):

$$(-r_{CF}) = \left( -\frac{dCF}{dt} \right)$$

Para reacciones donde no se conoce la estequiometria se asume el siguiente modelo cinético:

$$(-r_{CF}) = k(CF)^n \quad (3 - 6)$$

(Levenspiel, 1987).

Donde:

$(-r_{CF}) =$  Velocidad de variación de los coliformes fecales,  $\frac{NMP}{100ml \times día}$

$k =$  Coeficiente cinético,  $día^{-1} \left( \frac{NMP}{100ml} \right)^{1-n}$

$n =$  Orden de la reacción

$(CF) =$  concentración de coliformes fecales,  $\frac{NMP}{100ml}$

De manera que:

$$\left( -\frac{dCF}{dt} \right) = k(CF)^n \quad (3 - 7)$$

Aplicando logaritmo natural a ambos miembros se tiene:

$$\ln \left( -\frac{dCF}{dt} \right) = \ln k(CF)^n$$

$$\ln \left( -\frac{dCF}{dt} \right) = \ln k + n \ln(CF) \quad (3 - 8)$$

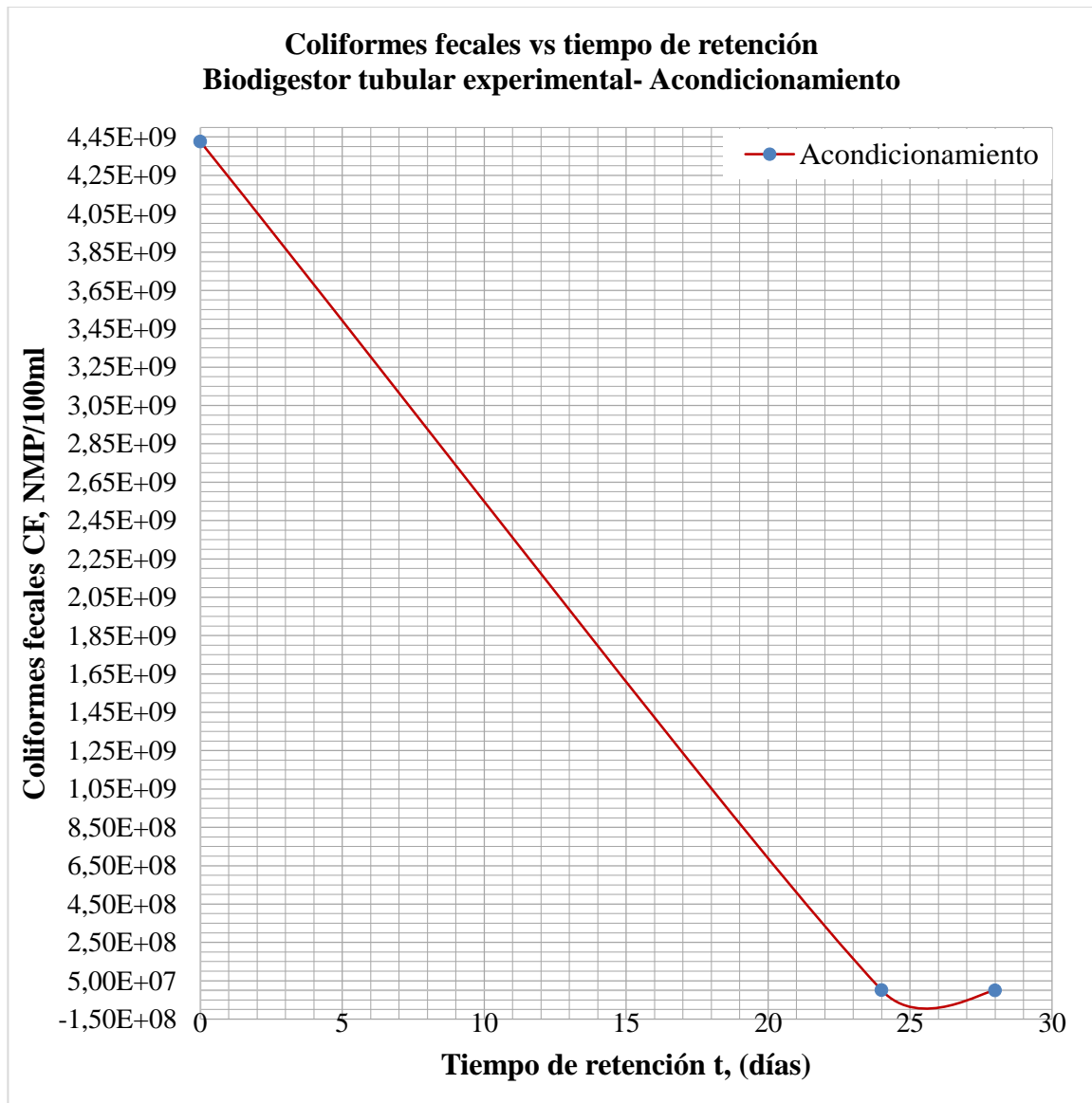
La ecuación (3-8) es análoga a la ecuación de una recta de la forma:

$$y = ax + b \quad (3 - 9)$$

A continuación, sigue la metodología de linealización de la pendiente media aplicando el método numérico de los tres puntos para encontrar los valores de k y n.

**Primera etapa: de acondicionamiento**, comprende 28 días se tienen tres datos obtenidos de los análisis que se grafican a continuación:

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-44  
Coliformes fecales vs tiempo de retención - Acondicionamiento.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

Para el método de los tres puntos se requiere que el intervalo entre cada valor del eje de las abscisas: tiempo de retención t sea constante. De manera que se hace un ajuste grafico de la curva, que se puede ver en el Anexo E, obteniéndose 8 puntos que se muestran en la siguiente tabla:



Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-43** Datos obtenidos del ajuste gráfico de la curva Coliformes fecales vs tiempo de retención – Primera etapa.

t (días)	CF (NMP/100ml)
0	4,43E+09
4	3,40E+09
8	2,50E+09
12	1,72E+09
16	1,07E+09
20	4,90E+08
24	2,18E+08
28	2,80E+03

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se calcula valores de las pendientes ( $Y'$ ) en cada punto con el método numérico de los tres puntos para encontrar el valor medio de la pendiente  $(-Y')=(-d(CF)/dt)$ , el detalle de éstos cálculos se muestran en el Anexo F, y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-44** Pendiente media en cada punto mediante el método de los tres puntos – Primera etapa.

$(Y')=d(CF)/dt$	$(-Y')=(-d(CF)/dt)$
-2,72E+08	2,72E+08
-2,40E+08	2,40E+08
-2,10E+08	2,10E+08
-1,77E+08	1,77E+08
-1,51E+08	1,51E+08
-1,20E+08	1,20E+08
-6,12E+07	6,12E+07
-4,76E+07	4,76E+07

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se calcula el logaritmo natural (ln) de la pendiente media y de la concentración de coliformes fecales:

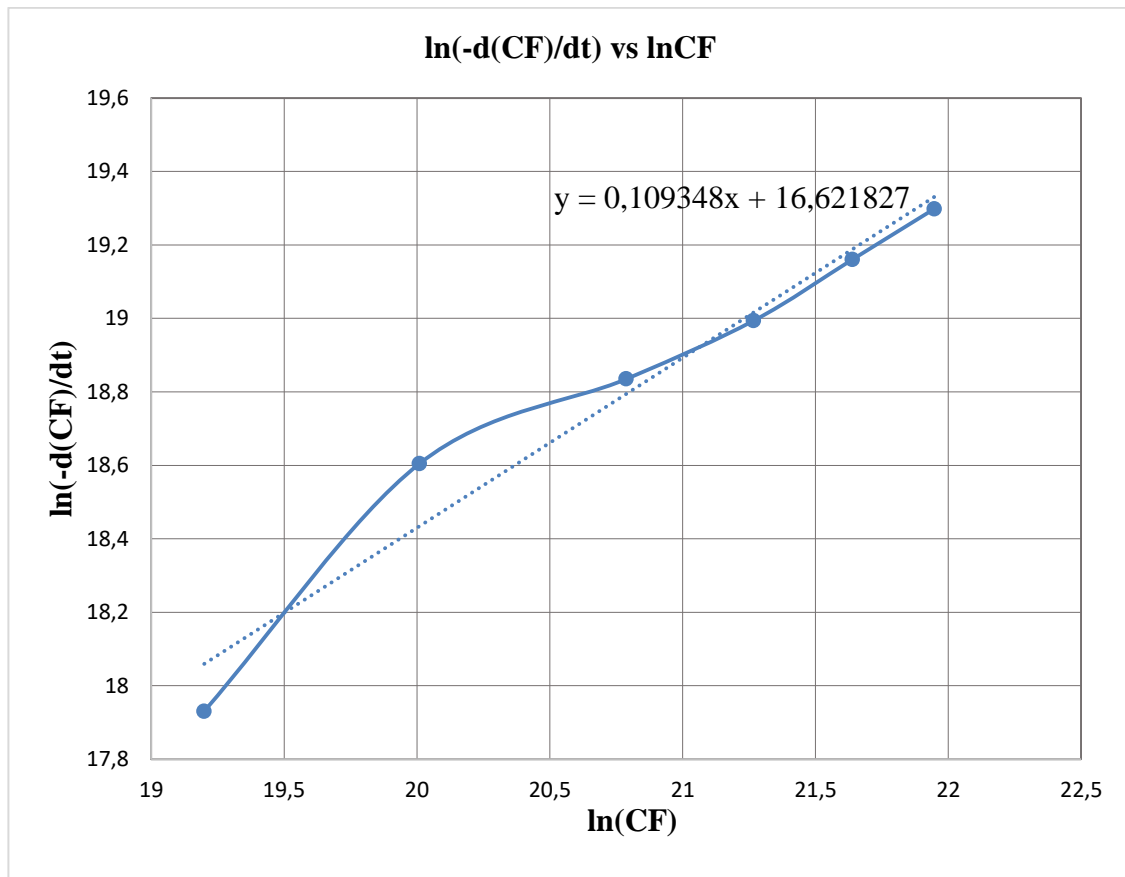
Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-45**  
Logaritmo natural de CF y la pendiente media – Primera etapa.

<b>ln(CF)</b>	<b>ln(-d(CF)/dt)</b>
22,210655	19,421577
21,947041	19,298165
21,639557	19,160638
21,266881	18,993698
20,787804	18,834904
20,009916	18,604737
19,198986	17,930469
7,9373747	17,679138

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se grafica entonces  $\ln(-d(CF)/dt)$  vs  $\ln(CF)$  y se ajusta la curva en Excel:

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-45** Gráfica de  $\ln(-d(CF)/dt)$  vs  $\ln(CF)$  – Primera etapa.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

De manera que la ecuación de la recta ajustada es:

$$\ln\left(-\frac{dCF}{dt}\right) = 16,621827 + 0,109348 \ln(CF) \quad (3 - 10)$$

Y como:

$$\ln\left(-\frac{dCF}{dt}\right) = \ln k + n \ln(CF)$$

Por analogía:

$$n = 0,109348$$

$$\ln k = 16,621827$$

$$k = e^{16,621827} = 751,3164992 \text{ día}^{-1} \left(\frac{NMP}{100ml}\right)^{1-n}$$

$$k = 751,3164992 \text{ día}^{-1} \left( \frac{NMP}{100ml} \right)^{0,890652}$$

Con lo que la ecuación cinética de la velocidad o variación de coliformes fecales de la primera etapa es:

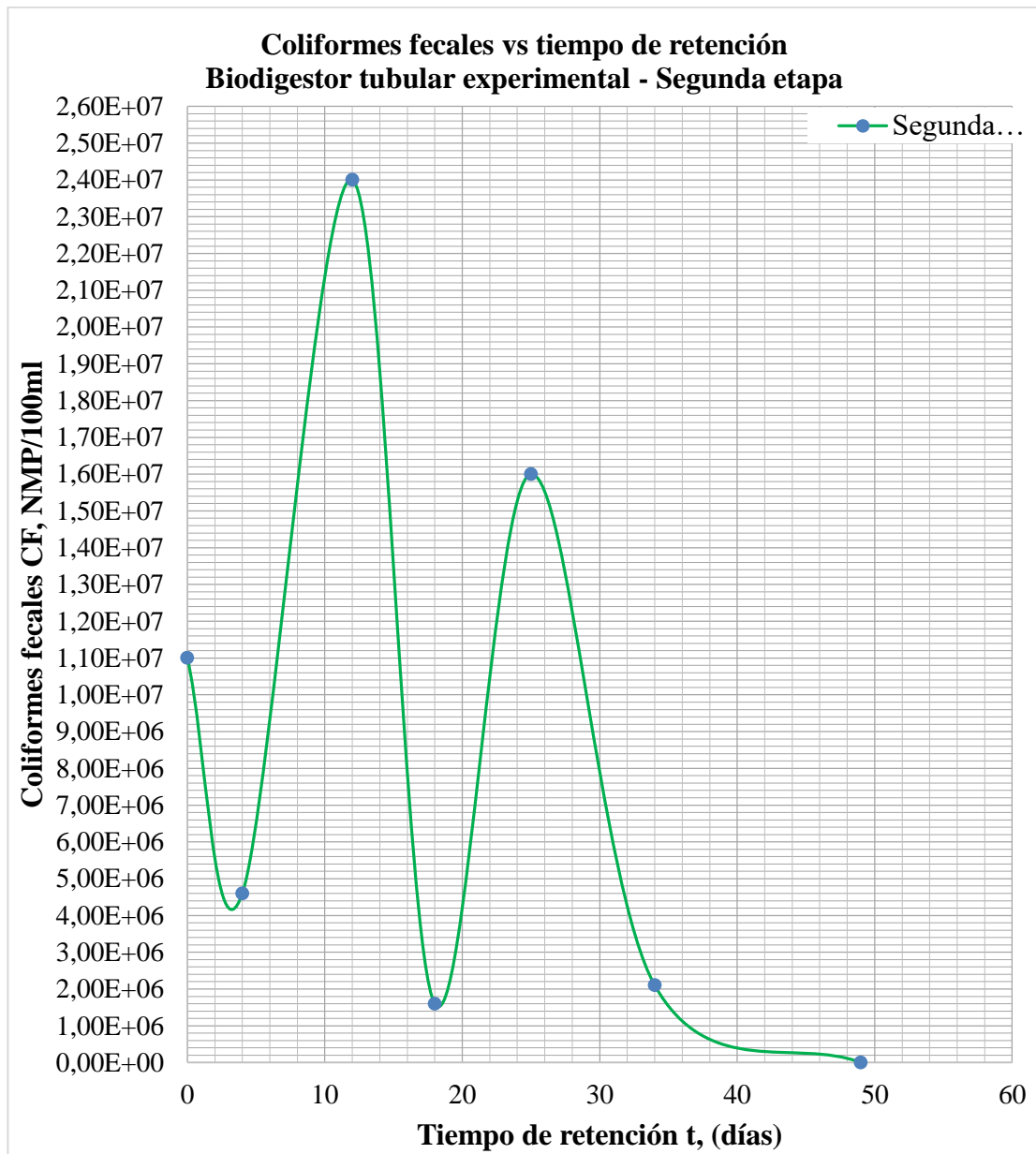
$$(-r_{CF}) = 751,3164992(CF)^{0,109348} \quad (3 - 11)$$

Y está en función de la concentración de coliformes fecales.

**Segunda etapa: de acondicionamiento**, comprende 49 días se tienen siete datos obtenidos de los análisis ya que el último se desprecia por aumentar nuevamente.

En esta etapa se ha visto que los derrames ocurridos durante la operación del biodigestor afectaron el producto aumentando la concentración de coliformes fecales CF, esto se puede ver en la Figura III-3 donde se ven claramente los picos en los días 12 y 25 que son los días en los que se encontró que hubo derrames de producto líquido por sobrepresión en el biodigestor.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-46  
Coliformes fecales vs tiempo de retención - Segunda etapa.



Elaboración propia. 2016.

Para el método de los tres puntos se requiere que el intervalo entre cada valor del eje de las abscisas: tiempo de retención  $t$  sea constante. De manera que se hace un ajuste gráfico de la curva, que se puede ver en el Anexo E, obteniéndose 8 puntos que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-46** Datos obtenidos del ajuste gráfico de la curva Coliformes fecales vs tiempo de retención – Segunda Etapa.

t (días)	CF (NMP/100ml)
0	1,10E+07
7	3,44E+06
14	2,06E+06
21	1,31E+06
28	8,13E+05
35	4,69E+05
42	2,00E+05
49	2,40E+03

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se calcula valores de las pendientes ( $Y'$ ) en cada punto con el método numérico de los tres puntos para encontrar el valor medio de la pendiente ( $-Y'$ )= $(-d(CF)/dt)$ , el detalle de éstos cálculos se muestran en el Anexo G, y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-47** Pendiente media en cada punto mediante el método de los tres puntos - Segunda etapa.

$(Y')=d(CF)/dt$	$(-Y')=(-d(CF)/dt)$
-1,52E+06	1,52E+06
-4,40E+05	4,40E+05
-1,38E+05	1,38E+05
-7,81E+04	7,81E+04
-5,61E+04	5,61E+04
-4,08E+04	4,08E+04
-3,32E+04	3,32E+04
-2,31E+04	2,31E+04

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se calcula el logaritmo natural (ln) de la pendiente media y de la concentración de coliformes fecales:

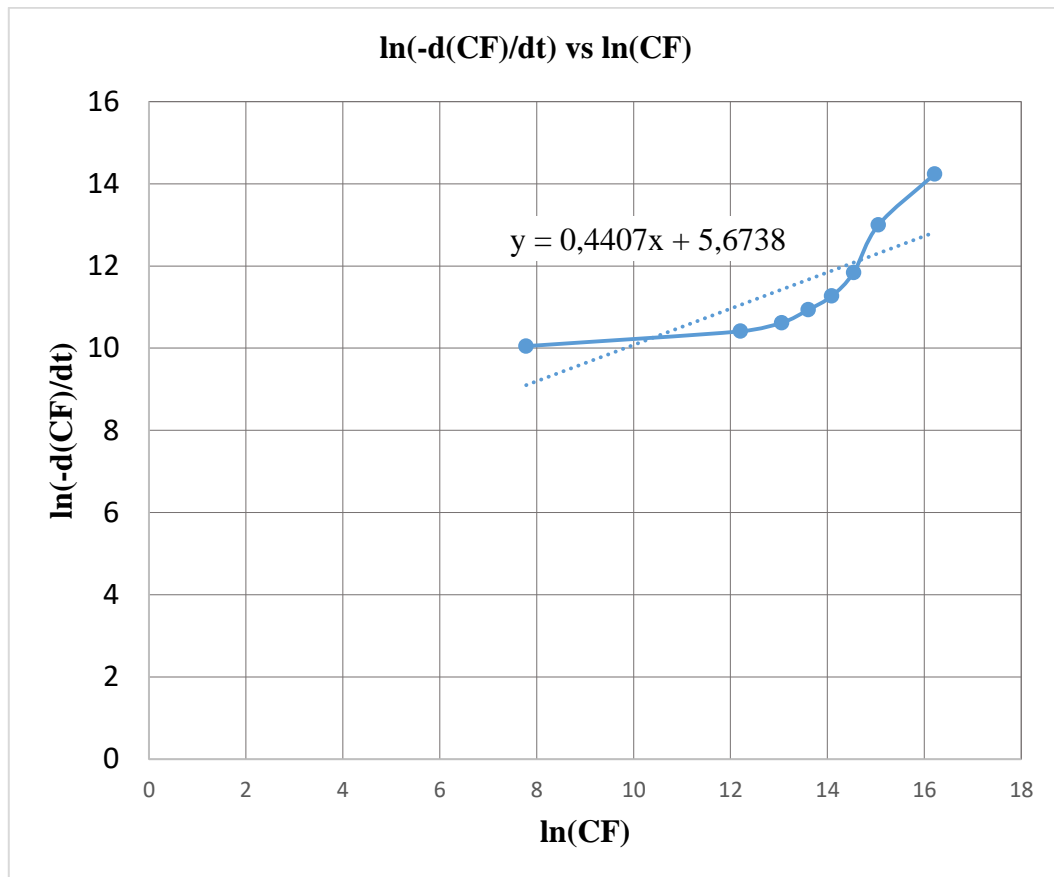
Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-48**  
Logaritmo natural de CF y la pendiente media - Segunda etapa.

<b>ln(CF)</b>	<b>ln(-d(CF)/dt)</b>
16,213406	14,235747
15,050255	12,993921
14,539429	11,837852
14,087444	11,266065
13,607871	10,934912
13,057825	10,617618
12,206073	10,409498
7,783224	10,049596

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se grafica entonces  $\ln(-d(CF)/dt)$  vs  $\ln(CF)$  y se ajusta la curva en Excel:

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-47** Gráfica de  $\ln(-d(CF)/dt)$  vs  $\ln(CF)$  - Segunda etapa.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

De manera que la ecuación de la recta ajustada es:

$$\ln\left(-\frac{dCF}{dt}\right) = 0,440703 \ln(CF) + 5,673778 \quad (3 - 12)$$

Y como:

$$\ln\left(-\frac{dCF}{dt}\right) = n \ln(CF) + \ln k$$

Por analogía:

$$n = 0,440703$$

$$\ln k = 5,673778$$

$$k = e^{16,621827} = 291,132357 \text{ día}^{-1} \left(\frac{NMP}{100ml}\right)^{1-n}$$



$$k = 291,132357 \text{ día}^{-1} \left( \frac{NMP}{100ml} \right)^{0,559297}$$

Con lo que la ecuación cinética de la velocidad o variación de coliformes fecales de la segunda etapa es:

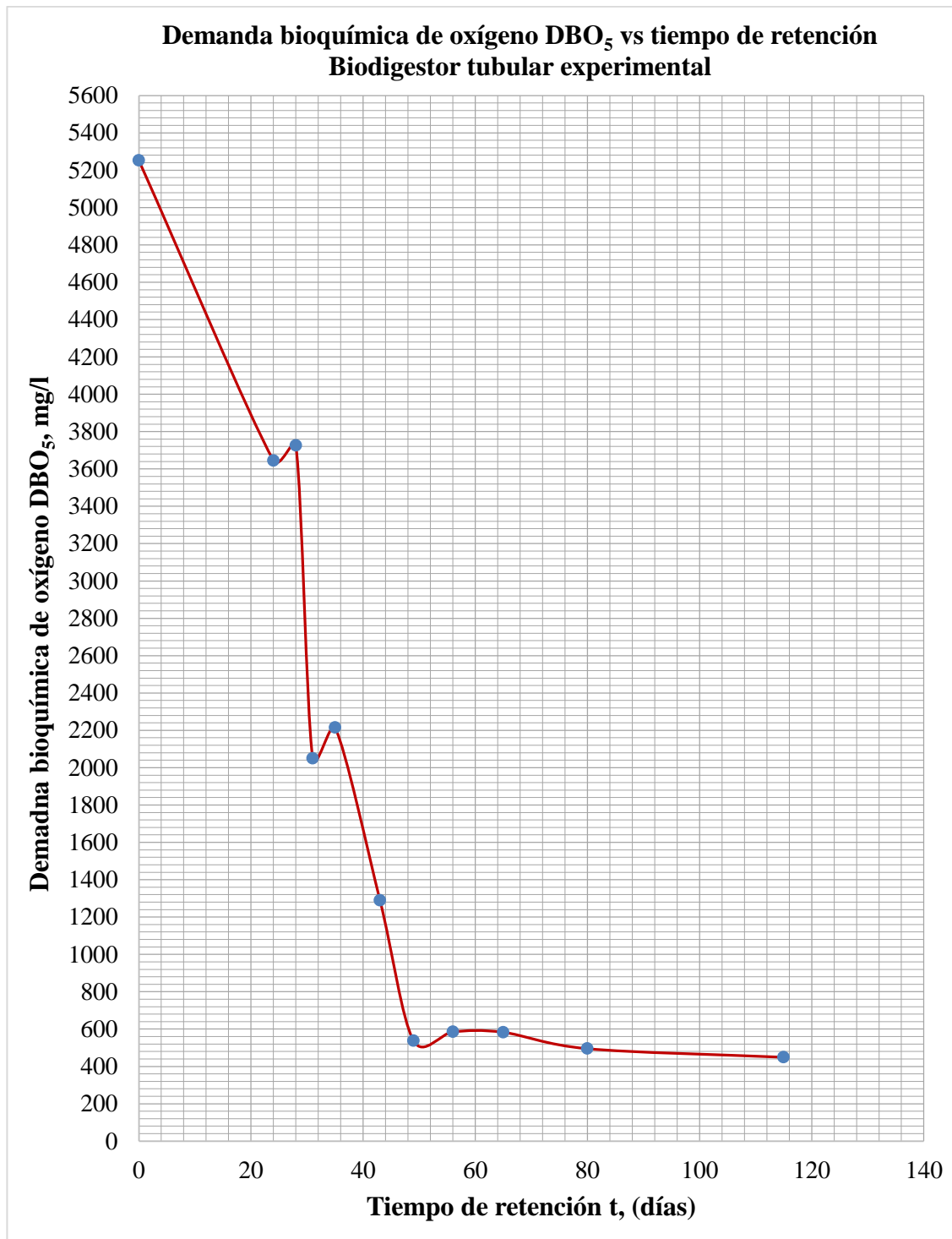
$$(-r_{CF}) = 291,132357(CF)^{0,440703} \quad (3 - 13)$$

Y está en función de la concentración de coliformes fecales.

### **III.2.6.2. DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE LA VARIACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DBO<sub>5</sub>.**

Los datos a partir de los cuales se determina la cinética de variación de la demanda bioquímica de oxígeno se encuentran en la Tabla III-12. A continuación, se grafican los valores de DBO<sub>5</sub> en función del tiempo de retención t.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-48 Gráfica de Demanda bioquímica de oxígeno DBO<sub>5</sub> en función del tiempo de retención t.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

Para determinación de la cinética de variación de la  $DBO_5$ , se excluye el último valor, ya que se considera constante debido a la pequeña variación que se puede apreciar en la Figura II-4 de manera que la cinética se determina con los datos hasta el día 80.

Como se ve en la Figura III-4 los valores obtenidos de  $DBO_5$  hasta el día 80 disminuyeron de forma uniforme y a diferencia de los coliformes fecales no se aprecian dos etapas. Lo cual indica que, si bien los CF y la  $DBO_5$  disminuyen, no lo hacen con la misma tendencia ni en la misma proporción.

Los coliformes fecales son anaerobios facultativos y a medida que disminuyen, disminuye también la demanda bioquímica de oxígeno, pero no son los únicos microorganismos que demandan oxígeno ya que en el proceso participan otros microorganismos que pueden demandar oxígeno. Por lo que ambos disminuyen, pero con diferente tendencia.

La velocidad de variación de la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) en función del tiempo de retención es igual a (ecuación I-8):

$$(-r_{DBO_5}) = \left( -\frac{dDBO_5}{dt} \right)$$

Para reacciones donde no se conoce la estequiometría se asume el siguiente modelo cinético:

$$(-r_{DBO_5}) = k(DBO_5)^n \quad (3 - 14)$$

(Levenspiel, 1987).

Donde:

$$(-r_{DBO_5})$$

= Velocidad de variación de la demanda bioquímica de oxígeno,  $\frac{mg}{l}$

$k$  = Coeficiente cinético,  $\text{día}^{-1} \left( \frac{mg}{l} \right)^{1-n}$

$n$  = Orden de la reacción

$(DBO_5)$  = Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno,  $\frac{mg}{l}$

De manera que:

$$\left(-\frac{dDBO_5}{dt}\right) = k(DBO_5)^n \quad (3-15)$$

Aplicando logaritmo natural a ambos miembros se tiene:

$$\ln\left(-\frac{dDBO_5}{dt}\right) = \ln k(DBO_5)^n$$

$$\ln\left(-\frac{dDBO_5}{dt}\right) = \ln k + n \ln(DBO_5) \quad (3-16)$$

La ecuación (3-16) es análoga a la ecuación de una recta (3-9) de la forma:

$$y = ax + b$$

A continuación, sigue la metodología de linealización de la pendiente media aplicando el método numérico de los tres puntos para encontrar los valores de k y n.

Se toma en cuenta para la determinación cinética los primeros 80 días en los cuales se obtuvieron diez datos de los análisis.

Para el método de los tres puntos se requiere que el intervalo entre cada valor del eje de las abscisas: tiempo de retención t sea constante. De manera que sea hace un ajuste grafico de la curva, que se puede ver en el Anexo E, obteniéndose 10 puntos que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-49 Datos obtenidos del ajuste gráfico de la curva Demanda bioquímica de oxígeno vs tiempo de retención.

t (días)	DBO <sub>5</sub> (NMP/100ml)
0	5252
8	4202,947368
16	3367,578947
24	2636,631579
32	1984
40	1501,052632
48	1083,368421
56	874,5263158
64	704,8421053
72	587,3684211
80	495

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se calcula valores de las pendientes (Y') en cada punto con el método numérico de los tres puntos para encontrar el valor medio de la pendiente  $(-Y') = (-d(\text{DBO}_5)/dt)$ , el detalle de éstos cálculos se muestran en el Anexo F, y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-50 Pendiente media en cada punto mediante el método de los tres puntos - DBO<sub>5</sub>.

(Y')=d(DBO <sub>5</sub> )/dt	(-Y')=(-d(DBO <sub>5</sub> )/dt)
-1,44E+02	1,44E+02
-1,14E+02	1,14E+02
-9,51E+01	9,51E+01
-8,78E+01	8,78E+01
-7,06E+01	7,06E+01
-5,64E+01	5,64E+01
-4,23E+01	4,23E+01
-2,69E+01	2,69E+01
-18,59455	1,86E+01
-7,334135	7,33E+00

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se calcula el logaritmo natural (ln) de la pendiente media y de la demanda bioquímica de oxígeno:

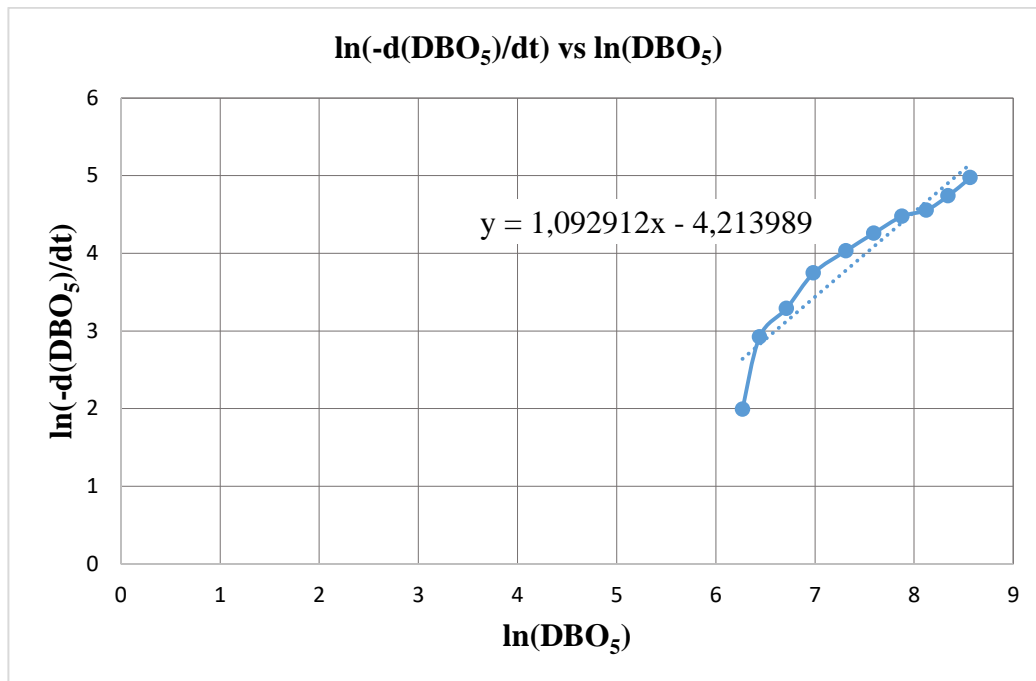
Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-51**  
Logaritmo natural de  $DBO_5$  y la pendiente media.

$\ln(DBO_5)$	$\ln(-d(DBO_5)/dt)$
8,566364	4,973188
8,343541	4,739367
8,121949	4,554661
7,877257	4,475441
7,592870	4,257523
7,313922	4,032190
6,984859	3,744455
6,713984	3,290857
6,442050	2,922869
6,269679	1,992539

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se grafica entonces  $\ln(-d(DBO_5)/dt)$  vs  $\ln(DBO_5)$  y se ajusta la curva en Excel:

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-49** Gráfica de  $\ln(-d(DBO_5)/dt)$  vs  $\ln(DBO_5)$ .



Fuente: Elaboración propia. 2016.

De manera que la ecuación de la recta ajustada es:

$$\ln\left(-\frac{d(DBO_5)}{dt}\right) = -4,213989 + 1,092912 \ln(DBO_5) \quad (3 - 17)$$

Y como:

$$\ln\left(-\frac{d(DBO_5)}{dt}\right) = \ln k + n \ln(DBO_5)$$

Por analogía:

$$n = 1,092912$$

$$\ln k = -4,213989$$

$$k = e^{-4,213989} = 0,014787 \text{ día}^{-1} \left(\frac{mg}{l}\right)^{1-n}$$

$$k = 0,014787 \text{ día}^{-1} \left(\frac{mg}{l}\right)^{-0,092912}$$

Con lo que la ecuación cinética de la velocidad o variación de la demanda bioquímica de oxígeno de la primera etapa es:

$$(-r_{DBO_5}) = 0,014787(DBO_5)^{1,092912} \quad (3 - 18)$$

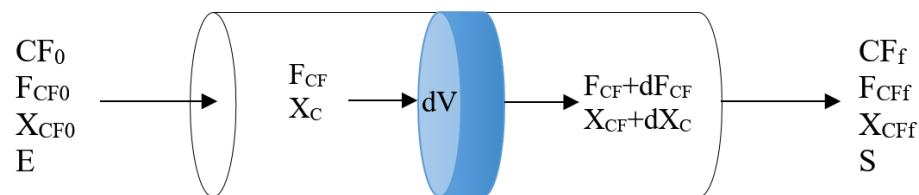
La cual está en función de la demanda bioquímica de oxígeno.

### III.2.7. REDISEÑO DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.

#### III.2.7.1. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN TOMANDO EN CUENTA LA CINÉTICA EN BASE A COLIFORMES FECALES.

El biodigestor experimental corresponde a un reactor de flujo pistón en fase líquida debido a que la cantidad de coliformes fecales varía a lo largo del biodigestor desde la entrada hasta la salida.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-50**  
Esquema biodigestor experimental como un reactor de flujo pistón.



Fuente: Elaboración propia. 2016.

En la figura anterior se pueden ver las corrientes de entrada y salida del biodigestor y de una sección  $dV$  tomada para realizar el balance de materia.

Donde:

$$CF_0 \text{ y } CF_f = \text{Concentración de CF inicial y final, } \frac{NMP}{100ml}$$



$F_{CF_0}$  y  $F_{CF_f}$  = Flujo de CF,  $\frac{NMP}{\text{día}}$ .

$X_{CF_0}$  y  $X_{CF_f}$  = Fracción de CF convertida en producto.

$E$  = Caudal volumétrico de entrada al biodigestor.

$S$  = Caudal volumétrico de salida del biodigestor.

$V_L$  = Volumen líquido del biodigestor.

$dV$  = Sección del biodigestor.

Se requiere rediseñar el biodigestor de manera que las concentraciones inicial y final sean:

$$CF_0 = 1,10 \times 10^7 \frac{NMP}{100ml}$$

$$CF_f = 1000 \frac{NMP}{100ml}$$

El valor inicial es el valor el primer valor con el que inicia la segunda etapa: 1,10E+07 NMP/100ml, y el valor final: 1000 NMP/100ml, es el límite permisible de acuerdo a la Ley del Medio Ambiente mencionado en el Capítulo I del presente trabajo.

El tiempo de retención requerido para rediseñar el biodigestor se calcula mediante la cinética determinada en la segunda etapa del proceso estudiado, porque ésta describe el proceso de digestión anaerobia en condiciones de flujo estable.

Al inicio del funcionamiento del biodigestor experimental hay una etapa de acondicionamiento, y una vez que las condiciones de flujo son estables y se ha llegado al volumen de operación del biodigestor comienza el proceso como tal. El valor inicial que se asume es para este caso particular y se puede tomar como referencia para otros biodigestores siempre y cuando la temperatura ambiente media del lugar sea cercana a la del presente trabajo (22,7 °C).

El tiempo que dure la etapa de acondicionamiento se debe sumar al tiempo de retención de diseño para que el producto líquido biol llegue a digerirse como se ha previsto.

A continuación, se realiza el balance de materia en una sección  $dV$  del biodigestor:

*Entrada de CF – Salida de CF*

$$= \text{Desaparece de CF} + \text{Acumulación de CF} \quad (3 - 19)$$

$$\text{Entrada de CF} = F_{CF} \quad (3 - 20)$$

$$\text{Salida de CF} = F_{CF} + dF_{CF} \quad (3 - 21)$$

$$\text{Desaparece de CF} = (-r_{CF})dV \quad (3 - 22)$$

$$\text{Acumulación de CF} = 0 \quad (3 - 23)$$

El término de acumulación se desprecia debido a que se supone un funcionamiento estacionario donde los flujos de entrada y de salida del biodigestor son iguales. Esto debido a que el volumen de operación líquido del biodigestor se mantuvo prácticamente constante durante el proceso.

El flujo de coliformes fecales se puede definir como  $F_{CF}$  se define como:

$$F_{CF} = F_{CF_0}(1 - X_{CF}) \quad (3 - 24)$$

Diferenciando:

$$dF_{CF} = -F_{CF_0}dX_{CF} \quad (3 - 25)$$

Reemplazando  $dF_{CF}$  en la ecuación (3-21) se tiene:

$$\text{Salida de CF} = F_{CF} - F_{CF_0}dX_{CF} \quad (3 - 26)$$

Reemplazando las ecuaciones (3-20), (3-26), (3-22) y (3-23) en el balance de materia (3-19) se tiene:

$$F_{CF} - (F_{CF} - F_{CF_0}dX_{CF}) = (-r_{CF})dV \quad (3 - 27)$$

Haciendo operaciones:

$$F_{CF_0} dX_{CF} = (-r_{CF}) dV \quad (3-28)$$

Al tratarse de un sistema de densidad constante:

$$X_{CF} = 1 - \frac{CF}{CF_0} \quad (3-29)$$

Diferenciando:

$$dX_{CF} = -\frac{d(CF)}{CF_0} \quad (3-30)$$

Ordenando e integrando la ecuación (3-28):

$$\begin{aligned} \frac{(-r_{CF})}{F_{CF_0}} \int_{V_0=0}^{V_f=V_L} dV &= \int_{X_{CF_0}}^{X_{CF_f}} dX_{CF} \\ \frac{(-r_{CF})}{F_{CF_0}} V_L &= \int_{X_{CF_0}}^{X_{CF_f}} dX_{CF} \quad (3-31) \end{aligned}$$

Multiplicando ambos miembros por la concentración de coliformes fecales iniciales  $CF_0$ :

$$CF_0 \times \frac{(-r_{CF})}{F_{CF_0}} V_L = \int_{X_{CF_0}}^{X_{CF_f}} dX_{CF} \times CF_0 \quad (3-32)$$

De la ecuación (3-30):

$$dX_{CF} \times CF_0 = -d(CF)$$

De manera que reemplazando en la ecuación (3-32):

$$\begin{aligned} CF_0 \times \frac{(-r_{CF})}{F_{CF_0}} V_L &= \int_{CF_0}^{CF_f} [-d(CF)] \\ CF_0 \times \frac{(-r_{CF})}{F_{CF_0}} V_L &= \int_{CF_f}^{CF_0} d(CF) \quad (3-33) \end{aligned}$$

Si  $F_{CF_0}$  se define como:

$$F_{CF_0} = CF_0 \times E \quad (3-34)$$

Entonces:

$$(-r_{CF}) \frac{V_L}{E} = \int_{CF_f}^{CF_0} d(CF) \quad (3-35)$$

Y como:

$$E = \frac{V_L}{t} \quad \therefore \quad \frac{V_L}{E} = t$$

Se tiene que:

$$t = \int_{CF_f}^{CF_0} \frac{d(CF)}{(-r_{CF})} \quad (3-36)$$

Reemplazando la ecuación cinética en función de coliformes fecales (3-13) en la ecuación (3-35) se tiene:

$$t = \int_{CF_f}^{CF_0} \frac{d(CF)}{291,132357(CF)^{0,440703}}$$

Haciendo operaciones:

$$t = \frac{1}{291,132357} \int_{CF_f}^{CF_0} (CF)^{-0,440703} d(CF)$$

Integrando:

$$t = \frac{1}{291,132357} \times \left( \frac{1}{0,559297} \right) (CF)^{0,559297} \Big|_{CF_f}^{CF_0}$$

Reemplazando  $CF_0$  y  $CF_f$ :

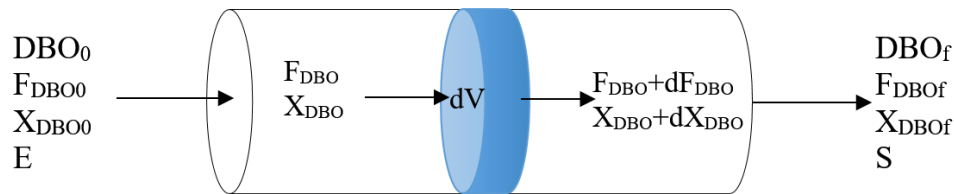
$$t = \frac{1}{291,132357} \times \left( \frac{1}{0,559297} \right) [(1,10 \times 10^7)^{0,559297} - (1000)^{0,559297}]$$

$$t = 52,979221 = 53 \text{ días}$$

### III.2.7.2. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN TOMANDO EN CUENTA LA CINÉTICA EN BASE A LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.

El biodigestor experimental corresponde a un reactor de flujo pistón en fase líquida, debido a que la demanda bioquímica de oxígeno varía a lo largo del biodigestor desde la entrada hasta la salida.

Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-51  
Esquema biodigestor experimental como un reactor de flujo pistón.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se pueden ver las corrientes de entrada y salida del biodigestor y de una sección  $dV$  tomada para realizar el balance de materia.

Donde:

$DBO_0$  y  $DBO_f$  = Demanda bioquímica de oxígeno inicial y final,  $\frac{mg}{l}$ .

$F_{DBO_0}$  y  $F_{DBO_f}$  = Flujo de DBO,  $\frac{mg}{día}$ .

$X_{DBO_0}$  y  $X_{DBO_f}$  = Fracción de DBO consumida.

$E$  = Caudal volumétrico de entrada al biodigestor.

$S$  = Caudal volumétrico de salida del biodigestor.

$V_L$  = Volumen líquido del biodigestor.

$dV_L$  = Sección del biodigestor.

Se requiere rediseñar el biodigestor de manera que las concentraciones inicial y final sean:

$$DBO_0 = 5252 \frac{mg}{l}$$

$$DBO_f = 80 \frac{mg}{l}$$

A continuación, se realiza el balance de materia en una sección  $dV$  del biodigestor:

*Entrada de DBO – Salida de DBO*

$$= \text{Desaparece de DBO} + \text{Acumula de DBO} \quad (3 - 37)$$

$$\text{Entrada de DBO} = F_{DBO} \quad (3 - 38)$$

$$\text{Salida de DBO} = F_{DBO} + dF_{DBO} \quad (3 - 39)$$

$$\text{Desaparece de DBO} = (-r_{DBO})dV \quad (3 - 40)$$

$$\text{Acumula de DBO} = 0 \quad (3 - 41)$$

El término de acumulación se desprecia debido a que se supone un funcionamiento estacionario donde los flujos de entrada y de salida del biodigestor son iguales. Esto debido a que el volumen de operación líquido del biodigestor se mantuvo prácticamente constante durante el proceso.

El flujo de demanda bioquímica de oxígeno  $F_{DBO}$  se define como:

$$F_{DBO} = F_{DBO_0}(1 - X_{DBO}) \quad (3 - 42)$$

Diferenciando:

$$dF_{DBO} = -F_{DBO_0}dX_{DBO} \quad (3 - 43)$$

Reemplazando  $dF_{DBO}$  en la ecuación (3-39) se tiene que:

$$\text{Salida de DBO} = F_{DBO} - F_{DBO_0}dX_{DBO} \quad (3 - 44)$$

Reemplazando las ecuaciones (3-38), (3-44), (3-40) y (3-41) en el balance de materia (3-37) se tiene que:

$$F_{DBO} - (F_{DBO} - F_{DBO_0}dX_{DBO}) = (-r_{DBO})dV \quad (3 - 45)$$

Haciendo operaciones:

$$F_{DBO_0} dX_{DBO} = (-r_{DBO}) dV \quad (3 - 46)$$

Integrando:

$$\frac{(-r_{DBO})}{F_{DBO_0}} \int_{V_0=0}^{V_f=V_L} dV = \int_{X_{DBO_0}}^{X_{DBO_f}} dX_{DBO}$$

$$\frac{(-r_{DBO})}{F_{CF_0}} V = \int_{X_{DBO_0}}^{X_{DBO_f}} dX_{DBO} \quad (3 - 47)$$

Multiplicando ambos miembros por la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno inicial  $DBO_0$ :

$$DBO_0 \times \frac{(-r_{DBO})}{F_{DBO_0}} V_L = \int_{X_{CF_0}}^{X_{CF_f}} dX_{DBO} \times DBO_0$$

Al tratarse de un sistema de densidad constante,  $X_{DBO}$  se define como:

$$X_{DBO} = 1 - \frac{DBO}{DBO_0} \quad (3 - 48)$$

Diferenciando:

$$dX_{DBO} = -\frac{d(DBO)}{DBO_0} \quad (3 - 49)$$

$$dX_{DBO} \times DBO_0 = -d(DBO)$$

La ecuación (3-47) queda:

$$DBO_0 \times \frac{(-r_{DBO})}{F_{DBO_0}} V_L = \int_{DBO_0}^{DBO_f} -d(DBO) \quad (3 - 50)$$

$$DBO_0 \times \frac{(-r_{DBO})}{F_{DBO_0}} V_L = \int_{DBO_f}^{DBO_0} d(DBO)$$

Si  $F_{DBO_0}$  se define como:

$$F_{DBO_0} = DBO_0 \times E \quad (3 - 51)$$

Entonces:

$$(-r_{DBO}) \frac{V_L}{E} = \int_{DBO_f}^{DBO_0} d(DBO) \quad (3 - 52)$$

Y como:

$$E = \frac{V_L}{t} \quad \therefore \quad \frac{V_L}{E} = t$$

Se tiene que:

$$t = \int_{DBO_f}^{DBO_0} \frac{d(DBO)}{(-r_{DBO})} \quad (3 - 53)$$

Reemplazando la ecuación cinética en función de la demanda bioquímica de oxígeno (3-18), se tiene que:

$$t = \int_{DBO_f}^{DBO_0} \frac{d(DBO)}{0,014787 (DBO)^{1,092912}} \quad (3 - 54)$$

Haciendo operaciones:

$$t = \frac{1}{0,014787} \int_{DBO_f}^{DBO_0} (DBO)^{-1,092912} d(DBO)$$

Integrando:

$$t = \frac{1}{-0,092912} \times \frac{1}{0,014787} (DBO)^{-0,092912} \Big|_{DBO_f}^{DBO_0}$$

$$t = \frac{1}{0,014787} \times \left( \frac{1}{-0,092912} \right) \left[ (DBO_0)^{-0,092912} - (DBO_f)^{-0,092912} \right] \quad (3 - 55)$$

Reemplazando  $CF_0$  y  $CF_f$ :

$$t = \frac{1}{0,014787} \times \left( \frac{1}{-0,092912} \right) \left[ (5252)^{-0,092912} - (80)^{-0,092912} \right]$$

$$t = 156,04 = 156 \text{ días}$$



### III.2.7.3. REDISEÑO DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL.

El tiempo de retención calculado, para cumplir con el límite permisible para descargas líquidas de coliformes fecales (1000NMP/100ml), es de 53 días (sin tomar en cuenta la etapa de acondicionamiento de 28 días); por otro lado, el tiempo de retención calculado en base a la demanda bioquímica de oxígeno es de 156 días para cumplir con el límite permisible de DBO<sub>5</sub> de 80 mg/l.

De manera que por significar los 156 días un tiempo muy extenso se toma en cuenta los 53 días de tiempo de retención en base a coliformes fecales ya que los incidentes como de derrames y movimiento de tuberías durante la operación del biodigestor pudo haber influido en la cinética de DBO<sub>5</sub>. Por lo que para cumplir con el límite de DBO<sub>5</sub> se recomienda una dilución adecuada y/o otros tratamientos posteriores.

Entonces, siendo el tiempo de retención de 53 días se procede a rediseñar el biodigestor para una carga diaria E de 215 ml, igual a la utilizada durante el estudio:

$$E = \frac{V_L}{t} \quad \therefore \quad V_L = E \times t$$

$$V_L = 215 \frac{ml}{día} \times 53 \text{ día}$$

$$V_L = 215 \frac{ml}{día} \times 53 \text{ día} = 11395 \text{ ml} = 11,3950 \text{ litros} = 0,011395 \text{ m}^3$$

Y asumiendo un 30 % de volumen para el biogás, 70 % para el líquido, el nuevo volumen del biodigestor será:

$$V_{BDG} = 11,3950 \text{ litros} \frac{100}{70} = 16,2786 \text{ litros}$$

Si el área transversal del biodigestor es la misma del diseño inicial:

$$A_t = \frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{\pi}{4} \times (15,65 \text{ cm})^2 = 192,3617 \text{ cm}^2$$

Entonces la longitud del biodigestor sería:

$$L = \frac{V}{A_t} = \frac{16278,6 \text{ cm}^3}{192,3617 \text{ cm}^2} = 84,6248 \text{ cm}$$

Con lo que la relación L/D:

$$\frac{L}{D} = \frac{84,6248 \text{ cm}}{15,65 \text{ cm}} = 5,4073$$

Valor de relación L/D dentro del recomendado (5-10) (Martí Herrero, Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación, 2008).

Cálculo de la DBO<sub>5</sub> en el producto final.

A continuación, se calcula el valor de DBO<sub>f</sub> final a los 81 días de tiempo de retención, que es el tiempo de retención de diseño más el tiempo que dura el acondicionamiento. Como se ha visto que la DBO<sub>5</sub> varía paralelamente de manera uniforme a lo largo de las dos etapas que se distinguen en la variación de coliformes fecales se toma en cuenta el tiempo que dura la etapa de acondicionamiento para conocer cuál es la demanda bioquímica de oxígeno del producto biol en ese tiempo.

De la ecuación (3-55) se despeja DBO<sub>f</sub>:

$$t = \frac{1}{0,014787} \times \left( \frac{1}{-0,092912} \right) \left[ (DBO_0)^{-0,092912} - (DBO_f)^{-0,092912} \right]$$

$$81 \times 0,014787 \times (-0,092912) = (5252)^{-0,092912} - (DBO_f)^{-0,092912}$$

$$\left( (DBO_f)^{-0,092912} \right)^{-\frac{1}{0,092912}} = (0,451167 + 0,111285)^{-\frac{1}{0,092912}}$$

$$DBO_f = 489,552670 \frac{mg}{l}$$

Se tendría un valor final de DBO<sub>5</sub> de 489,552670 mg/l, el cual está muy por encima del límite permisible, por lo cual se debe diluir el producto o realizar tratamientos posteriores luego de analizar del producto final biol cuando se tenga una producción

constante, esto sucede alrededor de un par de semanas después del tiempo de retención de diseño más la etapa de acondicionamiento.

A continuación, se calcula la dilución necesaria para que el biol no sobrepase el máximo permisible de DBO<sub>5</sub>.

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$C_1 = 489,552670 \frac{mg}{l}, \text{biol puro}$$

$$C_2 = 80 \frac{mg}{l}, \text{biol diluido}$$

$$V_1 = \text{Volumen de biol puro}$$

$$V_2 = \text{Volumen de biol diluido}$$

$$V_2 = xV_1$$

$$489,552670 \times V_1 = 80 \times xV_1$$

$$x = \frac{489,552670}{80} = 6,12$$

Siendo el porcentaje de dilución mínima:

$$\frac{V_1}{V_2} \times 100 = \frac{V_1}{6,12V_1} \times 100 = 16,34 \% \cong 16 \%$$

Y para dar un margen de seguridad se redondea al mínimo inferior de 15 %.

### III.3. ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO.

Los costos necesarios considerados en el presente proyecto de investigación se muestran a continuación:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**-52 Costos del Biodigestor de Polietileno Tubular Experimental.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	COSTO (Bs)
1	Materiales	472,1
3	Equipo e instrumentos para la construcción e instalación	137
4	Operación del Biodigestor Tubular Experimental	423,80
<b>TOTAL</b>		<b>1032,90</b>

Fuente: Elaboración propia. 2016.

El detalle de cada ítem se muestra en el Anexo I.

La siguiente tabla muestra el financiamiento recibido por parte de la Red de Apoyo al Sector Productivo de Tarija (RASP) para el desarrollo del proyecto:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-53**  
Financiamiento recibido por parte de la RASP Tarija.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	COSTO (Bs)
1	Material y equipo	1151
2	Análisis realizados en el CEANID - Biodigestor Tubular Experimental	2180,75
3	Análisis realizados en el CEANID - Pruebas preliminares	1036,75
<b>TOTAL</b>		<b>4368,5</b>

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Los análisis cubiertos por la RASP corresponden a los realizados durante la ejecución del proyecto. El detalle se muestra en el Anexo I.

El costo total del proyecto se indica a continuación en la siguiente tabla:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-54** Costo Total del Proyecto de Investigación.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	COSTO (Bs)
1	Materiales utilizados para el proyecto	1272
2	Equipos e instrumentos para la construcción e instalación durante el Proyecto	137
3	Operación del Biodigestor Tubular Experimental	423,80
4	Elaboración del Proyecto	1480
5	Análisis - Biodigestor Tubular Experimental, realizados en el CEANID	2180,75

6	Análisis - Pruebas preliminares, realizados en el CEANID	1036,75
<b>SUBTOTAL</b>		<b>6530,30</b>
7	Trabajo personal en la ejecución y elaboración del Proyecto	33360
<b>TOTAL</b>		<b>39890,30</b>

Fuente: Elaboración propia. 2016.

El detalle de cada ítem se encuentra en el Anexo I.

De manera que fuera de la valoración del trabajo personal realizado durante la ejecución del proyecto el costo total es de Bs 6530,30 siendo una parte financiada por la RASP con Bs 4368,50 y el restante Bs 2161,80 fue cubierto por la persona que realizó el estudio.

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

## CAPÍTULO IV.

### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### IV.1. CONCLUSIONES.

- Se ha realizado el seguimiento y la operación del biodigestor durante el tiempo de retención estudiado de 115 días con la medición de los parámetros necesarios, carga diaria, toma de muestras para análisis y mantenimiento del biodigestor. Después de este tiempo se ha realizado un seguimiento solo con carga diaria y mantenimiento. A lo largo del proceso no se cargó días domingos e imprevistos.
- De acuerdo a las mediciones realizadas el biodigestor opera a una temperatura ambiente media de 21,5 °C con una temperatura en la entrada de 22,7 °C y de 33,3 °C en la salida del biodigestor.

La temperatura promedio entre entrada y salida es de 28 °C siendo esta media una temperatura termofílica.

- Se ha caracterizado el estiércol vacuno, el estiércol preparado y el agua utilizada con los parámetros indicados a continuación:

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-55:**

Propiedades del estiércol vacuno, el estiércol preparado y el agua utilizada.

PARÁMETROS	Unidad	ESTIÉRCOL VACUNO	AGUA	ESTIÉRCOL PREPARADO
Temperatura, T	°C		21,9	22
pH			7,76	7,81
Densidad, $\rho$	g/ml	0,9728		
Humedad, Hm	%L	83,8		
Sólidos totales, ST	mg/l			23493,75
Sólidos volátiles, SV	mg/l			8089,85
Coliformes fecales, CF	NMP/100ml			4,43E+09
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO5	mg/l			5252
Fosforo total, P	mg/l			113
Nitrógeno total, N	mg/l			547,8
Potasio Total, K	mg/l			484,6

Fuente: Elaboración propia. 2016.

El estiércol vacuno con una densidad de 0,9728 g/ml y la humedad de 83,8 %L medida a 105 °C indica que el contenido de líquido es del 83,8 % en peso.

Tanto el agua como el estiércol preparado son básicos de acuerdo a los valores del pH.

El estiércol preparado tiene a simple vista gran cantidad de sólidos ya que se observan que sedimentan con facilidad en un vaso, mantiene el color marrón oscuro del estiércol y su peculiar olor.

De acuerdo a la ley del medio ambiente el estiércol preparado sobrepasa los límites admisibles de sólidos totales, coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno.

Los sólidos totales son 23,5 veces más el valor máximo. Los coliformes fecales 4,43E+06 veces más el límite de 1000NMP/100ml. La demanda bioquímica de oxígeno de 1050 veces más que el valor máximo. Estos valores son esperados ya que proceden de una dilución de estiércol de 1:4 de estiércol: agua.

- Las mediciones de la cantidad de biol producido luego de la carga al biodigestor arrojan una media de 100 ml, valor muy por debajo del teórico esperado de 215 ml. Este valor se atribuye a los días en los que no ha salido biol y en los que ha salido muy poco tras derrames imprevistos por sobrepresión dentro del biodigestor.

Sus propiedades características descritas por diferentes parámetros entre los que se resalta el valor de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno se muestran en la tabla siguiente:



Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-56:**

## Propiedades del Biol.

<b>PARÁMETROS</b>	<b>Unidad</b>	<b>BIOL</b>
Temperatura, T	°C	32,9
pH		6,95
Densidad, $\rho$	g/ml	0,9748
Sólidos totales, ST	mg/l	3520
Sólidos volátiles, SV	mg/l	2630
Coliformes fecales, CF	NMP/100ml	2,40E+03
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO <sub>5</sub>	mg/l	472
Fosforo total, P	mg/l	24,9
Nitrógeno total, N	mg/l	187
Potasio Total, K	mg/l	255

Fuente: Elaboración Propia.2016

La temperatura promedio alcanzada de 32,9 °C se ha logrado gracias al aporte por radiación de dos focos incandescentes de 40, 60 y 100 watt a lo largo del tiempo de retención en estudio.

El pH del biol es de 6,95 medido después de su salida del biodigestor.

La densidad del biol es casi igual a la del estiércol habiendo entre ellos una diferencia de 0,002, siendo menor la del estiércol por tener menor contenido de agua.

Los sólidos totales en el biol son de 3520 mg/l.

El contenido de coliformes fecales del biol es de 2,40E+03 NMP/100ml y el de DBO<sub>5</sub> de 472 mg/l ambos son mayores a los límites máximos admisibles según la ley del medioambiente N° 1333 indicados en la Tabla I-14.

El biol preparado con una dilución al 15 % tendría 528 mg/l de sólidos totales, 360 NMP/100ml de CF y 70,80 mg/l de DBO<sub>5</sub> cumpliendo con la reglamentación medioambiental para descargas líquidas. Con lo que sería apto su uso como fertilizante para el suelo, para riego foliar y para remojo de semillas tomando en cuenta el contenido de ST y CF.

A pesar de que la  $DBO_5$  del biol no cumple con la norma para su uso en cultivos indica que éste es rico en microorganismos, los mismos que mejoran la calidad del suelo por aportar nutrientes a los cultivos.

El contenido de N, P y K totales son mucho menores en el biol que en el estiércol preparado que se atribuye a la acumulación de sólidos dentro del biodigestor experimental. Esto indica que el biosol que se va acumulando dentro del biodigestor es rico en estos nutrientes, y por lo tanto su extracción en biodigestores tubulares es importante para su aprovechamiento.

- Se ha logrado una remoción de coliformes fecales de 99,999 %, de demanda bioquímica de oxígeno de 91,0129 %, de sólidos totales de 85,0173 % y sólidos volátiles de 67,4901 % en 80 días de tiempo de retención.

Además, se ha reducido la concentración de fósforo, nitrógeno y potasio total. Hubo una reducción de 77,9646 % de P, 65,8635% de nitrógeno y de 47,3793 % de potasio.

El proceso de digestión anaerobia del biodigestor experimental disminuye la cantidad de nutrientes N, P, K en el biol, pero al mismo tiempo disminuye la cantidad de agentes patógenos coliformes fecales habilitándolo para su uso.

- Se ha logrado determinar la cinética de la variación de los coliformes fecales y de la demanda bioquímica de oxígeno obteniéndose las siguientes expresiones:

$$(-r_{CF}) = 291,132357(CF)^{0,440703}$$

$$(-r_{DBO_5}) = 0,014787(DBO_5)^{1,092912}$$

Ambas ecuaciones están en función de la concentración.

- Con los valores límite de coliformes fecales de 1000NMP/100ml y demanda bioquímica de oxígeno de 80 mg/l se ha rediseñado el biodigestor experimental obteniéndose un volumen de 16,2786 litros con una diferencia de 5,7431 litros del volumen de diseño inicial de 10,535 l y 4 días más que el tiempo de retención estimado en un inicio de 49 días.

Por lo tanto, se requiere un tiempo de retención de 53 días y un volumen de 16,2786 para obtener un biol que tenga no más de 1000 NMP/100ml de coliformes fecales y 489,5527 mg/l de DBO<sub>5</sub>.

#### **IV.2. RECOMENDACIONES.**

- Se ha visto que la presión dentro del biodigestor influye en la cantidad de biol que sale, se recomienda revisar la válvula de salida de biogás de manera que el biogás producido pueda ser conducido fuera del biodigestor y así evitar sobrepresiones en el biodigestor que cambien la dinámica de flujo de líquido dentro del mismo causando derrames de biol y afecten el proceso, rupturas u otros incidentes.
- Los biodigestores de polietileno tubular son biodigestores que operan a temperatura ambiente y reciben ganancia térmica por radiación solar, si se presenta el caso de que estará bajo techo se debe de proveer calor de alguna manera en el caso de biodigestores experimentales de laboratorio se pueden usar focos incandescentes para suplir algo el aporte calórico por radiación solar ausente.
- Los biodigestores de polietileno tubular deben de estar protegidos y aislados para evitar y/o disminuir la pérdida de calor ya que las temperaturas altas (mesófilas y termófilas) favorecen la degradación de la materia orgánica por los microorganismos del proceso de digestión anaerobia.
- El mantenimiento en un biodigestor experimental objeto de estudio debe de ser igualmente adecuado, revisar las tuberías, revisar la botella con agua que hace de válvula de seguridad para que no le falte agua. En el caso del biodigestor estudiado el mismo fue armado con una costura lateral pegada que debe ser revisada para detectar posibles fugas. En la operación del biodigestor estudiado se ha colocado sella roscas de tubería periódicamente.
- Debido a que la composición del líquido varía de la entrada a la salida de manera similar a un reactor de flujo pistón, no se debe de mover el biodigestor, tubería de entrada, tubería de salida y tampoco forzar la salida de biol pues se ha visto que

estas acciones rompen el equilibrio existente pues el flujo forzado hace que se contamine partes del biodigestor en las que ya se habían reducido los agentes patógenos como los coliformes fecales.

- El biodigestor de polietileno tubular experimental una vez estabilice la producción de gas y biol reduce los malos olores causados por el estiércol, si bien a un inicio esto no es apreciable a medida que transcurre el tiempo esto se hace notar. Además de malos olores reduce la proliferación de moscas y mosquitos, los cuales depende de la estación del año y del clima pueden aparecer en mayor o menor cantidad. Para controlar esto se recomienda tapar las tuberías de entrada y de salida, pero sobre todo la de entrada tras la carga correspondiente del biodigestor.
- En cuanto a la operación se debe de realizar con mucho cuidado la manipulación del estiércol, estiércol preparado y biol pues los dos primeros tienen altos niveles de microorganismos patógenos, la operación se debe de realizar con guantes de goma, utilizar barbijo y mandil (o ropa de trabajo apropiada) y se deben de lavar y desinfectar las manos tras finalizar la operación.
- Se debe de operar con mucho cuidado y la limpieza del área donde está ubicado el biodigestor es importante, sobre todo si es un área donde hay personas ajenas al biodigestor que puedan contaminarse en contacto con algún instrumento u objeto contaminado. Todos los instrumentos y equipos utilizados se deben lavar y desinfectar apropiadamente y deben de estar destinados sólo para el uso en la operación del biodigestor para evitar contaminación de material, equipo y personas.
- Debido a que no es posible llegar al límite admisible de  $\text{DBO}_5$  de 80 mg/l y solo se llega a 489,5527 mg/l con el rediseño, para cumplir con el límite se debe diluir el biol al 15 %.
- En biodigestores de este tipo cuando se tenga un producto constante se lo debe caracterizar para verificar la reducción de agentes patógenos estimada, y en caso de que no sea así, primero verificar que el biodigestor esté operando

adecuadamente y tener cuidado de diluir el biol antes de usarlo de manera cumpla con los parámetros ST, CF y DBO<sub>5</sub> indicados anteriormente

Se podría realizar tratamientos posteriores a la digestión anaerobia para el biol, como filtración, sedimentación; altas temperaturas y radiación solar previa adición de peróxido de hidrógeno y sales de hierro Fe<sup>3+</sup> (procesos fotocatalíticos). La calidad del biol y los posibles tratamientos mencionados deben estudiarse por ejemplo en un trabajo posterior a este como tema de Proyecto de Grado.

- Siendo este trabajo el primero desde el enfoque de la Ingeniería Química, tomando en cuenta la cinética del proceso de Digestión Anaerobia de variables como los CF y DBO<sub>5</sub>, que indican si el producto biol es seguro de manipular por seres humanos y la aplicación en los cultivos; se recomienda un trabajo posterior a éste como tema de Proyecto de Grado, siguiendo el mismo enfoque pero teniendo en cuenta los incidentes y problemas que pueden ocurrir durante la operación de un biodigestor y evitarlos, de manera que esta tecnología sea mayormente sustentada para su implementación en nuestro medio.
- Se recomienda que estudiantes y/o profesionales del área agrícola y forestal realicen un estudio posterior para cualificar y cuantificar las propiedades que aporta el biol a los cultivos, pues si bien se obtuvo el producto biol, no se ha estudiado sus propiedades en aplicación práctica como abono orgánico en suelos, semillas y plantaciones.