

DESARROLLO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE  
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS  
PROVENIENTES DE LA PLAZA DISTRITAL DE MERCADO SIETE DE AGOSTO

MARÍA ANGÉLICA FORERO CARRASCO  
ANDREA CATALINA SÁNCHEZ QUEVEDO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2017

DESARROLLO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE  
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS  
PROVENIENTES DE LA PLAZA DISTRITAL DE MERCADO SIETE DE AGOSTO

MARÍA ANGÉLICA FORERO CARRASCO  
ANDREA CATALINA SÁNCHEZ QUEVEDO

Proyecto de grado para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO

Director:  
FELIPE CORREA MAHECHA  
Ingeniero Químico

Orientador:  
EDGAR FERNANDO MORENO  
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2017

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C., Julio de 2017

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Ing. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Decano Facultad de Ingeniería Química

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la vida y la bendición de tener una maravillosa familia, a mis padres, dueños de mis triunfos, por formarme para ser una mujer responsable, luchadora y perseverante, a mi hermana que desde la distancia me enseña que la vida no es para tener miedos, a mi tío que ha sido un apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, y a mi compañera Andrea y su familia, por su paciencia y comprensión para la realización del proyecto.

Este es el primero de muchos triunfos.

María Angélica Forero Carrasco

## **DEDICATORIA**

A Dios, por haberme permitido culminar mis estudios y haberme dado fortaleza durante todo el proceso. A mis padres por haber sido el motor y ejemplo de perseverancia y motivación para no desfallecer. A mi madre, por ser la persona que más quiero y admiro, por haberme dado la vida, amor y comprensión sin importar nuestra diferencia de opiniones. A mi tía, por motivarme en los momentos más difíciles. A mi hermano por paciencia y ayuda y a mi compañera, por las alegrías y tristezas que se tuvo y porque sin el equipo que formamos no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

Andrea Catalina Sánchez Quevedo

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

**Ing. Felipe Correa**, por ser nuestro Director y haber sido paciente durante todo el proceso, brindarnos todo su apoyo, conocimiento, confianza y tiempo desde el inicio hasta el fin del proyecto, por enseñarnos que hay “muchacha ciencia por aprender y por enseñar”.

**Ing. Fernando Moreno**, por su amabilidad y comprensión e indicarnos el camino y dirección en todo momento.

**Instituto Para la Economía Social**, por permitirnos el desarrollo del proyecto.

**Ing. Mateo Méndez**, por su colaboración y apoyo.

**Mabel Quintero**, Microbióloga de la Universidad Industrial de Santander, por haber aportado su conocimiento para la realización del proyecto.



## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	23
<b>OBJETIVOS</b>	24
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	25
1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA	25
1.1.1 Hidrólisis	26
1.1.2 Acidogénesis	27
1.1.3 Acetogénesis	28
1.1.4 Metanogénesis	28
1.2 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	28
1.2.1 Material de carga	28
1.2.2 Temperatura	29
1.2.3 pH	30
1.2.4 Humedad y Sólidos totales	30
1.2.5 Relación C:N:P	31
1.2.6 Tiempo de retención	31
1.2.7 Sólidos volátiles	32
1.2.8 Tamaño de partícula	32
1.2.9 Adición de inóculo	32
1.3 BIODIGESTORES	34
1.3.1 Tipos de reactores	34
1.3.1.1 Reactores de tanque agitado continuo	34
1.3.1.2 Reactores laguna cubierta	35
1.3.1.3 Reactores de contacto	35
1.3.1.4 Reactor de flujo ascendente	35
1.3.1.5 Sistema de dos etapas	36
1.3.2 Tipos de operación	36
1.3.2.1 Reactor Continuo	36
1.3.2.2 Reactor Semicontinuo	37
1.3.2.3 Reactor Tipo Batch	37
1.4 PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	37
1.4.1 Biogás	37
1.4.1.1 Componentes principales del biogás	38
1.4.1.2 Medición del biogás	38
<b>2. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS</b>	40
2.1 PLAZA DISTRTAL DE MERCADO SIETE DE AGOSTO	40
2.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS	40
2.3 SISTEMA DE RECOLECCIÓN	42
2.4 MUESTREO DE RESIDUOS ORGÁNICOS	43
2.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO	44

2.6 ESTIMACIÓN PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	45
<b>3. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b>	<b>47</b>
3.1 SELECCIÓN VARIABLES DE PROCESO	47
3.1.1 Adición de inóculo	47
3.1.2 Cantidad de sólidos totales	49
3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	50
3.2.1 Montaje individual	50
3.2.2 Montaje colectivo	52
3.3 MATERIAL DE CARGA	53
3.3.1 Montaje experimental 1	54
3.3.2 Montaje experimental 2	55
3.3.3 Montaje experimental 3	56
3.3.4 Condiciones de carga	56
3.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA	58
3.4.1 Comportamiento de pH	58
3.4.1.1 Montaje experimental 1	58
3.4.1.2 Montaje experimental 2	59
3.4.1.3 Montaje experimental 3	61
3.4.2 Comportamiento de producción de biogás y temperatura	64
3.4.2.1 Montaje experimental 1	64
3.4.2.2 Montaje experimental 2	64
3.4.2.3 Montaje experimental 3	69
3.4.3 Cromatografía de gases	74
<b>4. DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR</b>	<b>77</b>
4.1 TIPO DE BIODIGESTOR	77
4.2 CINÉTICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	77
4.3 ECUACIONES DE DISEÑO	80
4.3.1 Reactor tipo semibatch	81
4.3.2 Reactor tipo CSTR	83
4.4 VOLUMEN DE BIODIGESTOR	86
4.5 BALANCE DE MATERIA	91
4.5.1 Balance de materia reactor 1 y 2	91
4.5.2 Balance de materia reactor 3	93
4.5.3 Biodigestores	94
4.5.4 Condiciones de operación	95
4.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN	96
4.6.1 Dimensiones del agitador	96
4.6.2 Potencia del agitador	98
4.6.3 Potencia del motor	100
4.6.4 Diámetro del eje del agitador	101
4.7 EQUIPOS ADICIONALES	104
4.7.1 Triturador	104
4.7.2 Bomba para semisólidos	105

4.7.3 Motor del agitador	106
4.7.4 Contenedor	106
4.8 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS	108
4.8.1 Diagrama de flujo en bloques	108
4.8.2 Diagrama de flujo de proceso	109
<b>5. ANÁLISIS FINANCIERO</b>	110
5.1 ANÁLISIS DE INVERSIÓN (CAPEX)	110
5.1.1 Inversión para la producción de biogás	110
5.2 ANÁLISIS DE OPERACIÓN (OPEX)	111
5.2.1 Costos directos de producción	111
5.2.2 Costos indirectos de producción	111
<b>6. CONCLUSIONES</b>	113
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	115
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	117
<b>ANEXOS</b>	123

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Relación temperatura-tiempo de retención y eficiencia del biogás	32
<b>Tabla 2.</b> Características generales del biogás	37
<b>Tabla 3.</b> Componentes comunes e impurezas presentes en el biogás	38
<b>Tabla 4.</b> Generación de R.O de la plaza de mercado Siete de agosto en los meses julio y septiembre de 2016 y enero de 2017	41
<b>Tabla 5.</b> Caracterización del material orgánico	44
<b>Tabla 6.</b> Estimación producción de biogás PDM Siete de Agosto y Plazas de mercado de Bogotá	45
<b>Tabla 7.</b> Caracterización de estiércol bovino	48
<b>Tabla 8.</b> Condiciones de carga para cada biodigestor	57
<b>Tabla 9.</b> Cromatografía de gases	75
<b>Tabla 10.</b> Condiciones de operación teóricas y experimentales	78
<b>Tabla 11.</b> Parámetros cinéticos a 35°C	79
<b>Tabla 12.</b> Resultados a partir de B. Deepnraj, V. Sivasubramanian y S. Jayaraj	80
<b>Tabla 13.</b> Condiciones de carga al CSTR	86
<b>Tabla 14.</b> Flujos de entrada y salida del biodigestor 1	92
<b>Tabla 15.</b> Flujos de entrada y salida del biodigestor 2	93
<b>Tabla 16.</b> Condiciones de operación para cada reactor	95
<b>Tabla 17.</b> Dimensiones a partir de las semejanzas geométricas	97
<b>Tabla 18.</b> Resumen dimensiones de reactores y agitadores	104
<b>Tabla 19.</b> Costos de equipos	110
<b>Tabla 20.</b> Costos directos de producción	111
<b>Tabla 21.</b> Costos indirectos de producción	111
<b>Tabla 22.</b> Costos de mano de obra	112
<b>Tabla 23.</b> Producción de biogás y metano para cada tipo de sustrato	126
<b>Tabla 24.</b> Condiciones de temperatura trabajadas en artículos y tesis	128
<b>Tabla 25.</b> Condiciones de pH para artículos y tesis	130
<b>Tabla 26.</b> Contenido de sólidos totales en tesis y artículos	132
<b>Tabla 27.</b> Tiempo de retención en tesis y artículos	133
<b>Tabla 28.</b> Promedio generación de R.O de las Plazas de mercado de Bogotá	140
<b>Tabla 29.</b> Carga del biodigestor, Montaje experimental 1	147
<b>Tabla 30.</b> Carga del biodigestor, Montaje experimental 2	148
<b>Tabla 31.</b> Carga del biodigestor, Montaje experimental 3	148
<b>Tabla 32.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días	149
<b>Tabla 33.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 7SIN	152

<b>Tabla 34.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 6CON	153
<b>Tabla 35.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 10CON	153
<b>Tabla 36.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 12SIN	154
<b>Tabla 37.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 4SIN	154
<b>Tabla 38.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 7CON	155
<b>Tabla 39.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 5SIN	155
<b>Tabla 40.</b> Registro de pH y temperatura cada 5 días 10CON	155
<b>Tabla 41.</b> Registro producción de biogás para todos los ensayos, Montaje experimental 2 (Marzo 20-Abril 18)	156
<b>Tabla 42.</b> Registro producción de biogás para todos los ensayos, Montaje experimental 3 (Mayo 3-Junio 2)	157
<b>Tabla 43.</b> Parámetros cinéticos del modelo Gompertz.	160
<b>Tabla 44.</b> Composición del biogás	160
<b>Tabla 45.</b> Parámetros a partir resultados reportados por DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S.	162

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Comportamiento pH 7SIN	59
<b>Gráfica 2.</b> Comportamiento pH 10SIN	59
<b>Gráfica 3.</b> Comportamiento pH 6CON	60
<b>Gráfica 4.</b> Comportamiento pH 10CON	60
<b>Gráfica 5.</b> Comportamiento pH 4SIN	61
<b>Gráfica 6.</b> Comportamiento pH 5SIN	62
<b>Gráfica 7.</b> Comportamiento pH 7CON	63
<b>Gráfica 8.</b> Comportamiento pH 10CON	63
<b>Gráfica 9.</b> Temperatura y producción de biogás 10SIN1	64
<b>Gráfica 10.</b> Temperatura y producción de biogás 10SIN2	65
<b>Gráfica 11.</b> Temperatura y producción de biogás 10SIN3	65
<b>Gráfica 12.</b> Temperatura y producción de biogás 7SIN1	66
<b>Gráfica 13.</b> Temperatura y producción de biogás 7SIN2	66
<b>Gráfica 14.</b> Temperatura y producción de biogás 7SIN3	66
<b>Gráfica 15.</b> Temperatura y producción de biogás 10CON1	67
<b>Gráfica 16.</b> Temperatura y producción de biogás 10CON3	68
<b>Gráfica 17.</b> Temperatura y producción de biogás 6CON2	68
<b>Gráfica 18.</b> Temperatura y producción de biogás 6CON3	69
<b>Gráfica 19.</b> Temperatura y producción de biogás 4SIN1	70
<b>Gráfica 20.</b> Temperatura y producción de biogás 4SIN2	70
<b>Gráfica 21.</b> Temperatura y producción de biogás 5SIN1	71
<b>Gráfica 22.</b> Temperatura y producción de biogás 5SIN2	71
<b>Gráfica 23.</b> Temperatura y producción de biogás 7CON1	72
<b>Gráfica 24.</b> Temperatura y producción de biogás 7CON2	72
<b>Gráfica 25.</b> Temperatura y producción de biogás 10CON1	73
<b>Gráfica 26.</b> Temperatura y producción de biogás 10CON2	73
<b>Gráfica 27.</b> Producción acumulada de biogás	79
<b>Gráfica 28.</b> Integración gráfica de Levenspiel	82
<b>Gráfica 29.</b> Integración gráfica para el volumen de un CSTR	84
<b>Gráfica 30.</b> Integración gráfica, volumen del CSTR con $X=2,78\%$	85
<b>Gráfica 31.</b> Relación volumen del reactor CSTR y el $CH_4$ producido	88
<b>Gráfica 32.</b> Volumen de reactores en serie	89
<b>Gráfica 33.</b> Relación entre potencia y RPM	98
<b>Gráfica 34.</b> Comportamiento pH 9CON	149
<b>Gráfica 35.</b> Comportamiento pH 14CON	150
<b>Gráfica 36.</b> Comportamiento pH 6SIN	150
<b>Gráfica 37.</b> Comportamiento pH 8SIN	150
<b>Gráfica 38.</b> Comportamiento temperatura 9CON	151
<b>Gráfica 39.</b> Comportamiento temperatura 14CON1	151

<b>Gráfica 40.</b> Comportamiento temperatura 6SIN	151
<b>Gráfica 41.</b> Comportamiento temperatura 8SIN	152
<b>Gráfica 42.</b> Número de potencia frente a número de Reynolds	163

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Esquema de rutas para la digestión anaerobia	26
<b>Figura 2.</b> Proceso de digestión para los rumiantes	33
<b>Figura 3.</b> Esquema CSTR	35
<b>Figura 4.</b> Reactor de flujo ascendente	36
<b>Figura 5.</b> Método volumétrico	39
<b>Figura 6.</b> Mapa Plaza Distrital de Mercado Siete de Agosto, Bogotá	40
<b>Figura 7.</b> Clasificación de residuos por colores	43
<b>Figura 8.</b> Condiciones de operación para cada ensayo	50
<b>Figura 9.</b> Esquema montaje individual	51
<b>Figura 10.</b> Esquema montaje individual con recirculación de agua	51
<b>Figura 11.</b> Esquema colectivo del montaje experimental	53
<b>Figura 12.</b> Ejemplo de etiqueta para cada ensayo	54
<b>Figura 13.</b> Condición real de ensayos elegidos	55
<b>Figura 14.</b> Esquema montaje experimental 3	56
<b>Figura 15.</b> Etiqueta y condiciones reales de operación para cada ensayo	57
<b>Figura 16.</b> Esquema reactor tipo semibatch	81
<b>Figura 17.</b> Esquema reactor CSTR	83
<b>Figura 18.</b> Configuración de reactores en paralelo y en serie	91
<b>Figura 19.</b> Biodigestor de 30m <sup>3</sup>	94
<b>Figura 20.</b> Biodigestor de 25m <sup>3</sup>	94
<b>Figura 21.</b> Semejanzas geométricas de un agitador tipo turbina	96
<b>Figura 22.</b> Trituradora-picadora sertaneja Master NOGUEIRA	105
<b>Figura 23.</b> Bomba para flujos semisólidos	105
<b>Figura 24.</b> Motor para el agitador	106
<b>Figura 25.</b> Tanque de almacenamiento en HDPE de 10m <sup>3</sup>	107
<b>Figura 26.</b> Método de cuarteo	135



## LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
<b>Ilustración 1.</b> PDM Siete de Agosto	41
<b>Ilustración 2.</b> Cuarto de basuras Plaza de Mercado del Siete de Agosto	42
<b>Ilustración 3.</b> Muestra de R.O cortados	44
<b>Ilustración 4.</b> Estiércol bovino fresco	48
<b>Ilustración 5.</b> Corrales ganado bovino, Frigorífico Guadalupe S.A.S.	49
<b>Ilustración 6.</b> Método de cuarteo	135
<b>Ilustración 7.</b> Montaje colectivo experimental	144
<b>Ilustración 8.</b> Método volumétrico	144
<b>Ilustración 9.</b> Recolectores de gas	145
<b>Ilustración 10.</b> Muestras de biogás	145

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Modelo cinético de Gompertz	78
<b>Ecuación 2.</b> Ecuación de diseño para reactor intermitente	82
<b>Ecuación 3.</b> Ecuación de diseño para un CSTR	84
<b>Ecuación 4.</b> Moles de carbono en el influente	87
<b>Ecuación 5.</b> Producción de metano en función del volumen del reactor	88
<b>Ecuación 6.</b> Moles de metano en el biogás	92
<b>Ecuación 7.</b> Volumen de metano en el biogás	92
<b>Ecuación 8.</b> Relación dimensión del tanque y el agitador	97
<b>Ecuación 9.</b> Número de Reynolds	99
<b>Ecuación 10.</b> Potencia del agitador	100
<b>Ecuación 11.</b> Potencia del motor	101
<b>Ecuación 12.</b> Determinación del Torque	102
<b>Ecuación 13.</b> Diámetro del eje del agitador	102

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Reacciones de digestión anaerobia	124
<b>Anexo B.</b> Producción de biogás y metano	126
<b>Anexo C.</b> Condiciones de temperatura	128
<b>Anexo D.</b> Condiciones de pH	130
<b>Anexo E.</b> Condiciones de sólidos totales	132
<b>Anexo F.</b> Condiciones de tiempo de retención	133
<b>Anexo G.</b> Plan de muestreo de residuos orgánicos	135
<b>Anexo H.</b> Caracterización R.O	136
<b>Anexo I.</b> Estimación producción de biogás a partir de R.O de plaza de mercado	139
<b>Anexo J.</b> Caracterización del estiércol bovino	141
<b>Anexo K.</b> Registro fotográfico del montaje experimental	144
<b>Anexo L.</b> Estimación material de carga al biodigestor	146
<b>Anexo M.</b> Registro de temperatura y pH	149
<b>Anexo N.</b> Registro de producción de biogas	156
<b>Anexo O.</b> Resultados cromatografía de gases	158
<b>Anexo P.</b> Parámetros cinéticos teóricos de la digestión anaerobia	160
<b>Anexo Q.</b> Número de potencia frente a número de Reynolds para turbinas de seis palas	163

## ABREVIATURAS

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
AGV	Ácidos grasos volátiles
DA	Digestión anaerobia
PDM	Plaza Distrital de Mercado
I:S	Relación Inóculo:Sustrato
R.O	Residuos orgánicos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos Volátiles

## GLOSARIO

**BIODIGESTORES:** depósito completamente cerrado donde la materia orgánica se fermenta sin presencia de aire.

**BIOGÁS:** gas producido por descomposición química de residuos orgánicos, compuesto por metano y dióxido de carbono en su mayoría.

**DIGESTIÓN ANAEROBIA:** proceso en el cual se descompone la materia orgánica en ausencia del oxígeno, generando gases y biomasa a partir de dos sustratos diferentes.

**DISPOSICIÓN FINAL:** manejo que se le da a los R. O. en lugares donde se prevenga la contaminación tanto a la población como a los ecosistemas.

**ENERGÍA RENOVABLE:** energía derivada de los recursos ilimitados e inagotables que son usados como alternativa a los combustibles fósiles y contaminantes.

**FERMENTACIÓN:** cambios químicos dados por microorganismos que transforman la materia prima, dándoles diferentes características a las que originariamente tenía.

**LIXIVIADOS:** líquido que se genera por la degradación de desechos.

**MATERIA ORGÁNICA:** frutas y verduras que por acción biológica se encuentran en descomposición.

**METANO:** componente principal del biogás y el cual es formado por procesos de degradación. Debido a su contaminación por altas emisiones, es el compuesto de interés.

**RECOLECCIÓN SELECTIVA:** separación de residuos sólidos para su posterior tratamiento.

**RESIDUOS ORGÁNICOS:** todos aquellos elementos sólidos de frutas y verduras que se han degradado con el tiempo y no son aptos para el consumo humano.

## RESUMEN

La presente investigación se realiza con el propósito de evaluar las características de los residuos orgánicos producidos por la Plaza Distrital de Mercado Siete de Agosto, ubicada en la ciudad de Bogotá, por medio de las cuales se determinan las condiciones físicas y químicas como la temperatura, humedad, pH, tiempo de retención, sólidos totales y adición o no de inóculo que influyen directamente en la producción del biogás, basándose también en una revisión bibliográfica para poder realizar la digestión anaerobia experimentalmente.

Se fijan condiciones de operación como la temperatura a 35°C y la presencia de un entorno anaerobio dentro del biodigestor logrado con la inyección de nitrógeno. Se monitorea temperatura y pH cada 5 días, y producción de biogás diariamente. El frigorífico Guadalupe realiza la donación del inóculo utilizado, estiércol bovino fresco, para evaluar su influencia en la digestión anaerobia. A partir de resultados experimentales y teóricos se desarrolla el dimensionamiento de un biodigestor continuo de mezcla completa que cuenta con un sistema calentamiento para mantener condiciones mesofílicas.

Finalmente se presentan los costos de producción de biogás que se componen de la inversión y los costos de operación del proceso.

La investigación se desarrolla en convenio con el Instituto Para la Economía Social quien provee las instalaciones de la Plaza Distrital de Mercado para la recolección de muestras y proporciona datos de generación de residuos reportados para el primer trimestre de 2017.

**Palabras clave:** Digestión anaerobia, residuos orgánicos, biodigestor, biogás, sólidos totales, sólidos volátiles.

## INTRODUCCIÓN

La Agencia Internacional de Energía, determina que para el 2040 la demanda energética aumentará en un 40%<sup>1</sup>, lo que conlleva al consumo obligatorio de los recursos modernos que se tienen para la generación de esta. Las fuentes de energía existentes no renovables producen gran cantidad de CO<sub>2</sub> contaminantes al medio ambiente, lo que da paso a la investigación e inversión en fuentes de energía más limpias que no produzcan tantas trazas de gases contaminantes y que si los producen, sea en menor cantidad.

El gas natural evidencia un mejor resultado entre combustibles fósiles aumentando su consumo en un 50%. Esto a causa de la disminución de la demanda de petróleo y disminución del uso del carbón por efectos negativos ambientales.

La biodigestión anaerobia, proceso que permite utilizar residuos orgánicos para un aprovechamiento energético, ha venido tomando fuerza con el pasar del tiempo, debido a que representa una alternativa a los recursos no renovables para proveer energía, además de generar una respuesta a la gran producción de residuos y su acumulación.

Los residuos orgánicos representan una problemática, debido a su gran cantidad y la deficiencia de un sistema de almacenamiento que no afecte a la población y al medio ambiente principalmente, y que por el contrario pueda aprovechar todo su potencial, tanto en producción de biogas como en producción de fertilizantes, que generen un beneficio en lugar de una pérdida.

Las plazas de mercado de la ciudad de Bogotá generan diariamente cantidades significativas de estos residuos orgánicos, que generan un problema debido al espacio que ocupan, los malos olores que emiten y la contaminación de la tierra donde se depositan, esto hace necesaria la evaluación de la implementación de un sistema de biodigestión como una alternativa, que, bajo condiciones adecuadas de operación, genere un beneficio económico, ambiental y social.

---

<sup>1</sup> WOLRD ENERGY OUTLOOK, Resumen ejecutivo, International Energy Agency, Resumen ejecutivo, 2016. p.1.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar la ingeniería conceptual para el proceso de producción de biogás mediante los residuos orgánicos provenientes de la Plaza Distrital de Mercado Siete de Agosto.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar los residuos orgánicos provenientes de la Plaza Distrital de Mercado Siete de Agosto.
2. Seleccionar condiciones físicas y químicas para el proceso de producción de biogás.
3. Dimensionar el biodigestor para el proceso de producción de biogás.
4. Establecer los costos de producción de biogás.



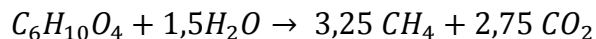
# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de digestión anaerobia consiste en la descomposición microbiológica de la materia orgánica en un ambiente ausente de oxígeno y húmedo<sup>2</sup>, produciendo una mezcla de gases denominada biogás que se compone principalmente de metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y trazas de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ )<sup>3</sup>.

Este proceso permite convertir residuos orgánicos como lo son residuos vegetales, estiércol animal, residuos urbanos orgánicos, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, entre otros, en subproductos útiles. Adicional se destaca que en la digestión anaerobia, el 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano<sup>4</sup>, obteniendo un proceso exitoso.

Se puede describir la digestión anaerobia según la siguiente reacción general<sup>5</sup>:



Para que este proceso se lleve a cabo, a continuación se muestran las 4 etapas del proceso en donde se obtienen cada uno de los productos mencionados en la reacción; en la figura 1, el esquema de las posibles rutas que se pueden dar en el proceso.

---

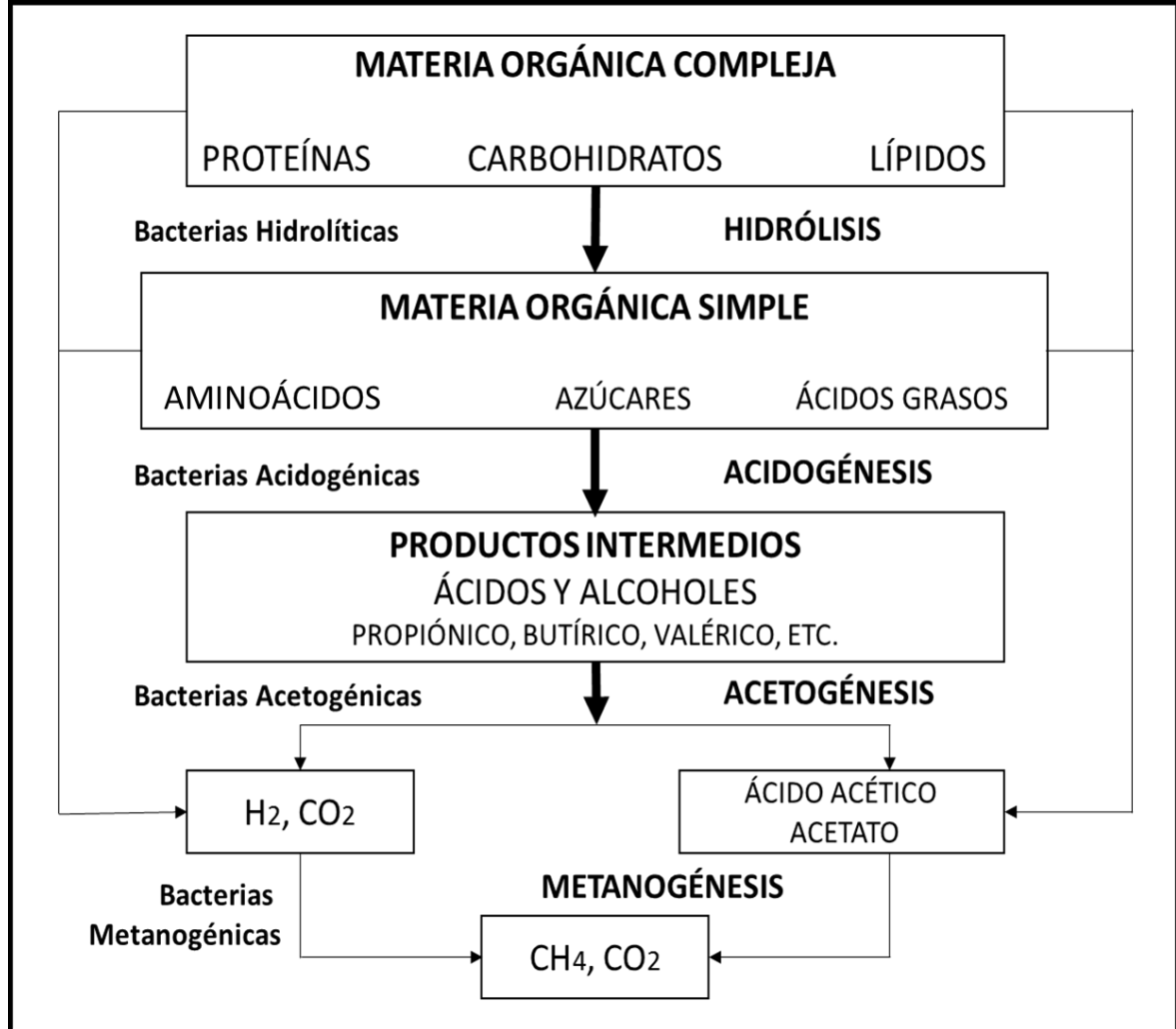
<sup>2</sup> GARCÍA RODRÍGUEZ, Angie Mariana y GÓMEZ FRANCO, Juan Daniel. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos en Bogotá mediante digestión anaerobia. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2016. p. 26.

<sup>3</sup> ORTEGA VALBUENA, Paola Margarita y PULIDO VALERO, Julieth Andrea. Desarrollo de un montaje por etapas a nivel banco para la obtención de biogás a partir de residuos vegetales. Bogotá D.C. 2014. p. 26.

<sup>4</sup> MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011. p. 14.

<sup>5</sup> BABSON M, David M. et al, Anaerobic digestion for methane generation and ammonia reforming for hydrogen production: A thermodynamic energy balance of a model system to demonstrate net energy feasibility, The Ohio State University, United States. 2013. p. 496.

**Figura 1.** Esquema de rutas para la digestión anaerobia.



**Fuente:** Adaptado de Co-digestion of municipal organic wastes with night soil and cow dung for biogas production: A review<sup>6</sup>.

Las etapas de la digestión anaerobia se explican a continuación.

**1.1.1 Hidrólisis.** Esta es la primera etapa de la digestión anaerobia en donde el sustrato (materia orgánica), compuesto por polímeros complejos como proteínas, lípidos y carbohidratos, será transformado por medio de bacterias anaerobias que pueden desarrollar un metabolismo respiratorio (facultativas) en moléculas de bajo peso molecular como azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos. Esta etapa es considerada como limitante de la velocidad del proceso por el alto contenido de

<sup>6</sup> GASHAW, Alemayehu. Co-digestion of municipal organic wastes with night soil and cow dung for biogas production: A Review. En: African Journal of Biotechnology. Bule Hora. 2016, vol. 15, no. 2, p. 32-44.

sólidos totales, los cuales son muy resistentes a la degradación microbiológica<sup>7</sup>. Este limitante en la velocidad global del proceso puede ser reducido por medio del uso de pretratamientos fisicoquímicos como lo son trituración del sustrato, ataque con ultrasonido, ataque químico, bien sea ácido o alcalino o pretratamientos térmicos<sup>8</sup>.

Los géneros de bacterias más frecuentes que participan en esta etapa son de “la familia *Enterobacteriaceae* además de los géneros *Bacillus*, *Peptostreptococcus*, *Propionibacterium*, *Bacterioides* *Micrococcus* y *Clostridium*”<sup>9</sup>.

**1.1.2 Acidogénesis.** En esta etapa los monómeros producidos en la hidrólisis se degradan y se obtiene ácido acético, ácido fórmico, hidrógeno y dióxido de carbono que podrán ser utilizados por las bacterias metanogénicas. Sin embargo, también pueden obtenerse otros productos como ácido butírico, ácido propiónico, ácido valérico, ácido láctico, los cuales deben ser oxidados por las bacterias acetogénicas en la siguiente etapa antes de ser utilizados por las bacterias metanogénicas<sup>10</sup>. Aproximadamente el 70% de la producción de metano en la digestión anaerobia depende de la degradación del ácido acético, de ahí la importancia de su obtención en esta etapa<sup>11</sup>.

Las bacterias que actúan en la acidogénesis son<sup>12</sup>: “*Syntrophobacter sapovorans*: oxida ácidos grasos de 4 a 8 carbonos y algunos ácidos grasos insaturados produciendo acetato, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, *Syntrophobacter wolinii*: oxida propionato generando acetato, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, *Syntromonas wolfei*: oxida ácidos monocarboxílicos saturados de 4 a 8 carbonos a acetato e H<sub>2</sub>, *Syntrophospara bryantii*: oxida ácidos grasos de 4 a 11 carbonos y *Syntrophus buswellii*: oxida el benzoato”.

Las vías de degradación<sup>13</sup> describen que para carbohidratos se obtendrá el ácido propiónico por la acción de bacterias vía succinato y acrilato. Adicional se obtiene

---

<sup>7</sup> ORTEGA VALBUENA, Op. Cit., p. 26.

<sup>8</sup> CENDALES LADINO, Edwin Dario. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Bogotá D.C. 2011. p. 13.

<sup>9</sup> DÍAS BÁEZ María consuelo, ESPITIA VARGAS Sandra Eliana, MOLINA PÉREZ Francisco. Digestión anaerobia, Citado por GARCÍA RODRÍGUEZ, Angie Mariana y GÓMEZ FRANCO, Juan Daniel. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos en Bogotá mediante digestión anaerobia. Bogotá D.C. 2016. p. 34-35.

<sup>10</sup> CENDALES LADINO. Op.Cit., p. 14.

<sup>11</sup> DEUBLEIN, Dieter y STEINHAUSER Angelika. Biogas from waste and renewable resource, Citado por CANALES GARCÍA, Marisa Celeste, RIVAS OLIVA Luis Alfredo y SORTO CRUZ, Roberto José. Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de El Salvador. San Salvador. 2010. p. 28.

<sup>12</sup> GARCÍA RODRÍGUEZ y GÓMEZ FRANCO. Op. Cit., p. 35.

<sup>13</sup> CANALES GARCÍA, Marisa Celeste, RIVAS OLIVA Luis Alfredo y SORTO CRUZ, Roberto José. Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de El Salvador. San Salvador. 2010. p. 26.

ácido butírico partiendo del ácido acético dado por bacterias *Clostridium* y para ácidos grasos, estos serán degradados por oxidación- $\beta$  tras la acción de bacterias formando acetato. Las reacciones de esta etapa se encuentran en el ANEXO A.

**1.1.3 Acetogénesis.** Esta etapa se lleva a cabo mediante los microorganismos acetógenos que transforman los productos obtenidos en la etapa anterior por medio de oxidación, en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por medio de microorganismos acetógenos.

Tres grupos de bacterias intervienen en esta etapa: homoacetogénicas, sintótrofas y sulforeductoras tales como Bacteroides, Clostridium, Propionobacterium. Las bacterias homoacetogénicas producen acetato a partir de la reducción de dióxido de carbono o a partir de los productos de la acidogénesis. De igual manera, las bacterias sintrótrofas producen hidrógeno, acetato y dióxido de carbono de ácido propiónico y butírico. Las bacterias sulforeductoras tienen como función establecer una relación con las bacterias sintótrofas que ayude a mantener el equilibrio energético transfiriendo hidrógeno, el cual debe controlarse porque inhibe la etapa<sup>14</sup>. La reacción general que representa esta etapa de la digestión se encuentra en el ANEXO A.

**1.1.4 Metanogénesis.** Es la última etapa y los microorganismos que actúan en esta son considerados los más importantes debido a que su principal producto es el metano. Estos microorganismos se dividen en tres grupos<sup>15</sup>, los hidrogenotróficos que consumen hidrógeno y ácido fórmico, los metilotróficos o acetoclásticos que metabolizan los grupos metilo del acetato, metanol y aminas y por último los microorganismos acetotróficos a los cuales se debe la mayor producción de metano durante el proceso, principalmente por la especie *Metanosarcina Barkeri* y otros como *Metanosaeta sp* o *Metanotrix sp*.

## 1.2 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La consulta bibliográfica de cada parámetro que influye en la digestión anaerobia se reporta en tablas que se encuentran en los ANEXOS B hasta F con el fin de comparar y evaluar los resultados obtenidos en artículos y trabajos de grado que desarrollaron el mismo proceso a escala laboratorio y planta piloto.

**1.2.1 Material de carga.** Son todos los residuos orgánicos que se utilizan para la digestión anaerobia. Este parámetro es importante porque los microorganismos que actúan en la fermentación necesitan suficientes nutrientes para realizar el proceso,

---

<sup>14</sup> ARNÁIZ, Carmen. ISAC, Laura. LEBRATO, Juman. Tratamiento biológico de aguas residuales. En: Revista Tecnología del Agua. Marzo de 2000.

<sup>15</sup> DEUBLEIN, Dieter y STEINHAUSER Angelika. Biogas from waste and renewable resource, Citado por CANALES GARCÍA, RIVAS OLIVA y SORTO CRUZ. Op. Cit., p. 16.

por lo tanto el sustrato deberá contener principalmente nitrógeno y carbono, para ser utilizado en la formación de la estructura celular, y este último también utilizado como fuente de energía<sup>16</sup>.

Los sustratos adecuados para este tipo de proceso son desechos orgánicos húmedos de origen agrícola, industrial, doméstico, municipal y estiércol animal, que a su vez se recomienda que sean mezclados ya que al combinarlos se puede tener un balance en la cantidad de nutrientes que contiene cada residuo, formando un consorcio de microorganismos que favorecerá el proceso de producción de biogás<sup>17</sup>.

En el ANEXO B se muestra la producción de biogás y contenido de metano esperado de acuerdo al sustrato evaluado. A partir de los resultados se puede estimar la producción de biogás de 388mL/gSV para condiciones mesófilas (35°C) cuando se utilizan residuos orgánicos de plaza de mercado.

**1.2.2 Temperatura.** La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia ya que determina la velocidad de degradación del proceso, principalmente de las etapas de hidrólisis y metanogénesis.

Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo<sup>18</sup>: psicrófilo: por debajo de 25°C, mesófilo: entre 30 y 40°C y termófilo: entre 50 y 60°C, en este último, tanto la velocidad de crecimiento microbiana como la velocidad de muerte de patógenos es mayor comparada con el rango mesófilo y aún mayor con el rango psicrófilo, por lo tanto la producción de biogás tiene mejores resultados a condiciones termófilas pero presenta desventajas, pues el sistema se considera inestable, presenta mayores variaciones y con impactos más marcados, ya que si la temperatura oscila los microorganismos tardarán más tiempo en adaptarse y no resistirán estos cambios. Adicionalmente se necesita un alto requerimiento energético en un tratamiento termófilo a diferencia de un tratamiento mesófilo que requiere menor consumo de energía y el proceso se puede controlar con mayor facilidad<sup>19</sup>. En el ANEXO C se muestran artículos y tesis que trabajaron diferentes temperaturas y sus resultados, por lo tanto se concluye que a condiciones termófilas la producción de biogás y asimismo el contenido de metano en éste es mayor que a condiciones mesófilas, la elección de una u otra radica en la afirmación de que las condiciones mesófilas permiten mayor estabilidad para el desarrollo de microorganismos y en general para el proceso, además se disminuye la producción

---

<sup>16</sup> GUEVARA VERA. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Citado por CANALES GARCÍA, RIVAS OLIVA y SORTO CRUZ. Op cit., p. 31.

<sup>17</sup> CARO MARTÍNEZ. Op. Cit., p.25.

<sup>18</sup> *Ibíd.*, p. 21.

<sup>19</sup> FERNANDEZ. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. Citado por DÍAZ DE BASUTO BURGOS, Aitor. Diseño, Construcción Y Puesta En Marcha De Un Biodigestor Anaerobio Con Residuos Orgánicos Generados En El Mercado De Tiquipaya (Bolivia). (Noviembre 21) 2013. p. 21.

de amonio, pues el equilibrio de la reacción que produce amoniaco tiende a la derecha (reactivos) impidiendo así la inhibición del sistema por exceso de éste y permitiendo el aprovechamiento del nitrógeno por los microorganismos como nutriente, mientras que para condiciones termófilas sucede el proceso inverso, razón por la cual se hace más difícil el control del proceso.

**1.2.3 pH.** El pH tiene gran influencia en el proceso ya que de éste dependerá la actividad o inhibición de los microorganismos para cada etapa de la digestión anaerobia. La mayoría de los microorganismos metanogénicos trabajan en un pH de 6.5-7.5, los acetogénicos de 7.0 y los acidogénicos de 6.0, por lo tanto se estima que el pH óptimo para el proceso se encuentra entre 6.5 y 7.5, si el proceso sobrepasa los límites de 6.2 y 8.5 se presentará una inhibición de los microorganismos que participan en este<sup>20</sup>. En el ANEXO D se muestran las condiciones de pH utilizadas en la bibliografía. Adicionalmente monitorear el pH es una ventaja porque se puede predecir la fase de la digestión en la que se encuentra el proceso.

**1.2.4 Humedad y Sólidos totales.** La cantidad de sólidos totales de la materia orgánica influye directamente en la producción de biogás y calidad del metano contenido en el mismo, pues el aumento de ST limita la movilidad de las bacterias metanogénicas y afecta la producción de biogás<sup>21</sup>.

Para el caso de un reactor tipo batch se ha demostrado que con un aumento de ST del 10% al 15% el volumen de metano producido decrece<sup>22</sup>, indicando que el aumento o disminución de ST del material cargado al biodigestor tiene un efecto directo sobre la producción de biogás. Para reactores semicontínuos, la carga de materia orgánica no debe contener más de 8 a 12% de ST con el fin de asegurar un buen funcionamiento del proceso, finalmente para reactores de flujo continuo se permite un contenido de ST de 40 a 60%<sup>23</sup>. Sin embargo, en el ANEXO E se muestran artículos y tesis consultadas que trabajaron como variable de proceso el contenido de sólidos totales y llegaron a conclusiones diferentes a las presentadas anteriormente. Por lo tanto, este factor es de gran importancia ya que al encontrar disertaciones en la bibliografía, se pone en duda el real efecto del contenido de ST durante el proceso.

---

<sup>20</sup> ORTEGA VALBUENA, Op. Cit., p. 28-29.

<sup>21</sup> Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op. Cit., p.36-38.

<sup>22</sup> ORJUELA CASTAÑO, Gloria Carolina y VILLARRAGA VALERO, Lilibiana Paola. Producción De Biogás Mediante La Fermentación Anaerobia De Los Residuos Orgánicos De La Cadena De Restaurantes WOK. Bogotá.: Universidad de los Andes, 2015. p. 22-23.

<sup>23</sup> MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Op. Cit., p.36-37.

**1.2.5 Relación C:N:P.** El balance entre macronutrientes y micronutrientes es esencial tanto para el crecimiento de los microorganismos como para la producción de biogás. Carbono y nitrógeno son los nutrientes principales en el proceso y por lo tanto se debe asegurar un suministro de estos en proporciones adecuadas; un exceso de carbono hace que éste no sea transformado por completo, disminuyendo el rendimiento del metano, y por otro lado un exceso de nitrógeno hace que cantidades de amoníaco indeseadas sean producidas, causando incluso la inhibición del crecimiento microbiano<sup>24</sup>. El rango óptimo para la relación C:N está entre 10:1 y 30:1.

Otros nutrientes importantes son fósforo y azufre, en donde el primero es necesario para formar adenosín trifosfato (ATP) y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP) los cuales son portadores de energía, y el segundo se involucra en el proceso siendo un constituyente de aminoácidos, llegando así a la relación C:N:P:S de 600:15:5:3<sup>25</sup>, incluso otros autores mencionan que esta relación puede encontrarse entre 500-1000:15-20:5:3<sup>26</sup>. Es importante resaltar que este parámetro tiene influencia en la estabilidad del sistema<sup>27</sup>.

Haciendo énfasis en la cantidad de nitrógeno y en especial de amoníaco, concentraciones por debajo de 1500mg/L son aceptadas y beneficiosas para el proceso, sin embargo a concentraciones superiores de 3000mg/L el agente tóxico es el ion amonio<sup>28</sup>.

**1.2.6 Tiempo de retención.** Este factor es el tiempo promedio de permanencia de la materia orgánica dentro del biodigestor, está directamente relacionado con la temperatura del proceso y el tipo de reactor a utilizar. Como se observa en la tabla 1, dependiendo de la temperatura del sistema el tiempo de retención será mayor o menor, asimismo la eficiencia del biogás se ve afectada.

---

<sup>24</sup> DEUTSCHE GESSELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT, Guía sobre el Biogás, traducido por Cooperación tecnológica en el sector energético y el Programa Gestión Ambiental Urbana e Industrial en México, 5 ed. Gülzow 2010. p. 24.

<sup>25</sup> *Ibíd.* p. 25.

<sup>26</sup> DEUBLEIN, Dieter y STEINHAUSER Angelika. Biogas from waste and renewable resource. Wenheim, Alemania. 2008. p. 116.

<sup>27</sup> MUSA I, Tanimu. Effect of Carbon to Nitrogen Ratio of Waste on Biogas Methane Production in a Batch Mesophilic Anaerobic Digester. *En: International Journal of Innovation: Management and Technology*, vol. 5, No. 2, Abril 2014.

<sup>28</sup> CHEN, Ye, CHENG, Jay y Kurt, CREAMER. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *En: Bioresource Technology*. Marzo, 2007, Vol. 99, p. 4044-4064.

**Tabla 1.** Relación temperatura-tiempo de retención y eficiencia del biogás.

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)	Eficiencia (m <sup>3</sup> biogás/m <sup>3</sup> digestor)
10-25 Psicrófilo	50-70	0.01 - 0.30
30-40 Mesófilo	20-30	0.70 - 1.00
40-55 Termófilo	<20	1.00 - 2.00

**Fuente:** NAVARRO ARANGO, Luis Carlos, Diseño y Construcción De Un Biodigestor Anaeróbico Para El Aprovechamiento Energético De La Biomasa y Uso Experimental Para La Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. Ocaña, 2015, p. 22.

Según lo anterior, se observa que a mayor temperatura de proceso el tiempo de retención hidráulico disminuirá y la eficiencia del biogás aumentará (siempre y cuando la temperatura no sobrepase el límite para microorganismos termófilos). Por el contrario, cuando la temperatura disminuye el tiempo de retención será más largo, y la eficiencia del biogás será menor. En el ANEXO F se muestra la influencia de este factor para varias condiciones de operación.

**1.2.7 Sólidos volátiles.** Es la fracción de sólidos totales que se libera de la muestra volatilizándose cuando se incinera durante 2 horas a 600°C<sup>29</sup>. En el proceso de digestión anaerobia, los sólidos volátiles son el volumen de materia orgánica que contiene la muestra cargada al reactor que será utilizado en la producción de biogás puesto que teóricamente son los componentes orgánicos que son convertidos en metano<sup>30</sup>.

**1.2.8 Tamaño de partícula.** Este factor se debe tener en cuenta porque durante el proceso de digestión se da la degradación de materiales lignocelulósicos la cual es muy lenta y puede ser una condición limitante del proceso, para contrarrestar esta condición, es necesario realizar un pre-tratamiento a la muestra de residuos orgánicos alimentada al reactor, reduciendo el tamaño de partícula para facilitar el inicio de la primera etapa de la digestión (hidrólisis)<sup>31</sup> por medio de trituración o molienda. El tamaño recomendado según varios autores es de 2mm con el fin de aumentar el área superficial para la adsorción de las enzimas hidrolíticas<sup>32</sup>.

**1.2.9 Adición de inóculo.** Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de digestión anaerobia se fundamenta en la acción de diversos microorganismos, los cuales se pueden adicionar por medio de un inóculo que puede ser rumen o estiércol

<sup>29</sup> MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Op. Cit., p. 36-37.

<sup>30</sup> CARO MARTÍNEZ. Op. Cit., p.27.

<sup>31</sup> LÓPEZ MÁRTINEZ. Op cit., p. 21.

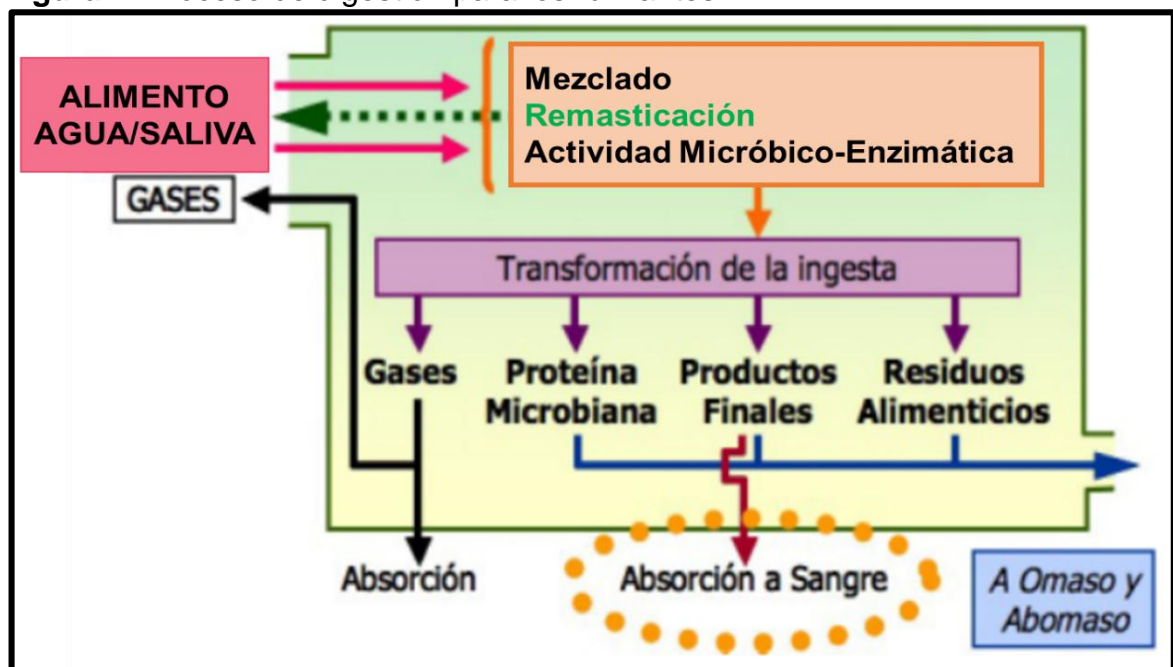
<sup>32</sup> MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Op. Cit., p. 36-37.



bovino fresco. La cantidad de inóculo debe basarse en la relación de sólidos volátiles presentes en el inóculo y sustrato la cuál puede variar entre 1 y 4 teniendo en cuenta que la relación afectará directamente la transferencia de energía y masa en el reactor<sup>33</sup>.

Los rumiantes poseen una cámara fermentativa pre-gástrica o tres pre-estómagos que se conforman por: el retículo, el rumen y el omaso, en donde se realiza la mayor parte de la digestión del alimento ingerido por el rumiante por medio de la fermentación microbiana, principalmente hidrólisis y oxidación anaeróbica<sup>34</sup>. En la figura 2 se muestra un esquema del proceso de digestión de los rumiantes.

**Figura 2.** Proceso de digestión para los rumiantes.



**Fuente:** Adaptado de Departamento de producción animal y pasturas. Curso de Anatomía y fisiología animal. Digestión en retículo-rumen<sup>35</sup>.

El proceso de digestión de los rumiantes, conlleva a la producción de metano y otros gases a partir de microorganismos contenidos en el sistema digestivo, por esta razón, tanto el rumen como el estiércol bovino aportan gran variedad de poblaciones microbianas que contribuyen a mejorar la producción de biogás pero debido a la alta

<sup>33</sup> ALZATE MONCADA, María Soledad y QUINTERO SILVA, Mabel. Caracterización de grupos tróficos durante un proceso de digestión anaerobia con lodo estiércol bovino usando un método de bajo costo. En: ION. vol. 29, no. 1, p. 117-123.

<sup>34</sup> DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL Y PASTURAS. Curso de Anatomía y fisiología animal. Digestión en retículo-rumen. 2008. [En Línea] Citado el 16, 12 de 2016. Disponible en: <http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/AFA/TEORICOS/Repartido-Digestion-en-Reticulo-Rumen.pdf> Montevideo. p. 1.

<sup>35</sup> *Ibid.* p.3.

sensibilidad de los microorganismos contenidos en el rumen, presenta mayor facilidad de manejo y disponibilidad el estiércol bovino. Esta sensibilidad se debe a que los microorganismos presentes en el rumen son anaerobios estrictos por lo tanto mueren al estar en contacto con el medio ambiente.

Al utilizar estiércol bovino como inóculo se favorece la formación de un consorcio de microorganismos los cuales sirven para adelantar la fase inicial de la digestión anaerobia, muestras que contienen inóculo superan la etapa ácida más rápido que los que no contienen inóculo, incluso para muestras sin inóculo la etapa ácida se supera hasta pasados 60 días, mientras que las muestras con inóculo superan la etapa ácida a los 11 y 16 días de experimento<sup>36</sup>. Adicionalmente estudios demuestran que la proporción sustrato:inóculo de 1:3 tendrá mejor producción de biogás<sup>37</sup>.

### 1.3 BIODIGESTORES

El diseño de reactores anaerobios depende de factores tales como: tiempo de retención, factores ambientales y carga orgánica. Pueden ser categorizados dependiendo de la retención de los microorganismos, ya sea de manera fija o suspendida. También puede clasificarse por su etapa, en sistemas convencionales o de alta tasa. Los sistemas convencionales son aquellos que manejan un volumen bajo de carga, tienen altos tiempos de retención y no tienen mecanismos para retener sólidos, mientras que los sistemas de alta tasa se caracterizan por tener mecanismos para retención de sólidos, sus tiempos de retención hidráulica son bajos, pero tienen tiempos de retención celular altos.

#### 1.3.1 Tipos de reactores.

**1.3.1.1 Reactores de tanque agitado continuo.** CSTR (Continuous-Stirred Tank Reactor) es uno de los reactores más usados en la digestión anaerobia. Es un reactor de flujo continuo, el contenido de sólidos totales varía entre 7% y 40% y su tiempo de retención se encuentra entre 20 a 50 días<sup>38</sup>. En la figura 3 se muestra un esquema de este tipo de reactor, donde  $C$  es la concentración de sustrato a la entrada, dentro del reactor y a la salida,  $X$ , es la composición de cada componente y  $Q$  es el caudal másico a la entrada del reactor y a la salida.

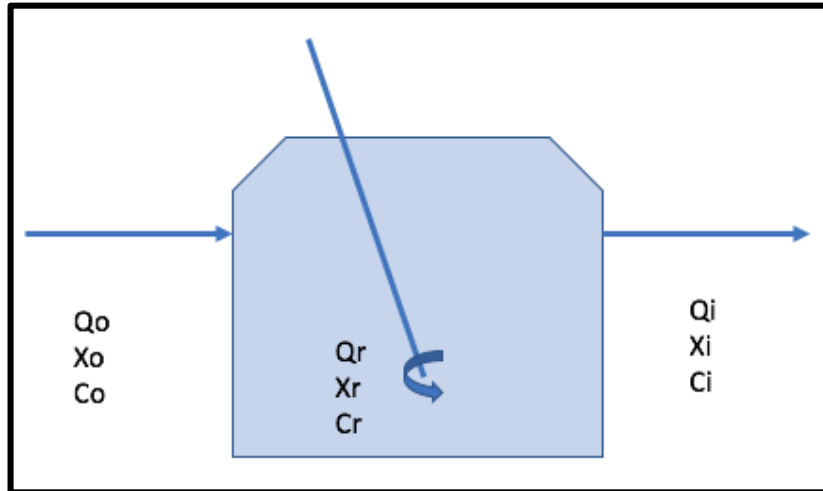
---

<sup>36</sup> LÓPEZ MARTÍNEZ, Germán. Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo. En: TECNURA. vol. 2, p. 31-43.

<sup>37</sup> ALCÁNTARA, FLORES, *et al.* Determinación Del Potencial Bioquímico Del Metano (Pbm) De Residuos De Frutas Y Verduras En Hogares. Octubre, 2015.

<sup>38</sup> HALLENBECK, Patrick C., *et al.* Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, ELSEVIER, 2017, p. 268.

**Figura 3.** Esquema CSTR.



**1.3.1.2 Reactores laguna cubierta.** Son aquellos que manejan un porcentaje de sólidos volátiles entre 0,5% y 3%. Estos reactores trabajan a condiciones ambientales y sus tiempos de retención pueden estar entre 3 y 6 meses, dándole una característica de almacenamiento de residuos. También ocurre que estos reactores se diseñan para manejar mezclas completas, lo que les da una característica similar a un CSTR y puede manejar los mismos principios<sup>39</sup>.

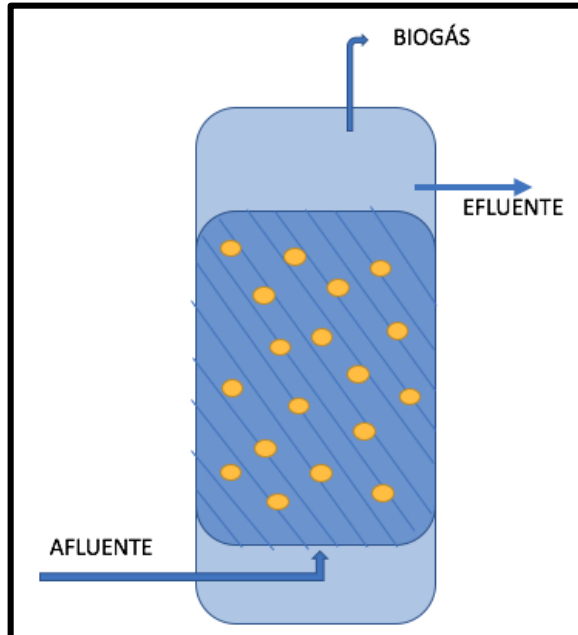
**1.3.1.3 Reactores de contacto.** Son reactores que en esencia tienen la configuración de un CSTR pero contienen un almacenamiento del líquido decantado la cual se recircula hacia el reactor, haciendo que este mantenga una concentración alta de biomasa cada vez que entre sustrato nuevo, haciéndolo un sistema de flujo suspendido. Estos reactores se utilizan cuando se quieren manejar principalmente aguas residuales con altos contenidos de sólidos totales<sup>40</sup>.

**1.3.1.4 Reactor de flujo ascendente.** Son reactores que mantienen una concentración alta de biomasa con gránulos densos que resisten el flujo ascendente, y las cuales ascienden gracias a las burbujas de gas producidas hasta llegar a suspenderse y por medio de las cuales se obtiene biogás que se recolecta y el efluente se trata posteriormente. (Figura 4).

<sup>39</sup> Ibíd, p. 763.

<sup>40</sup> HALLENBECK, Patrick C., et al, Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, ELSEVIER, 2017, p. 269.

**Figura 4.** Reactor de flujo ascendente.



**1.3.1.5 Sistema de dos etapas.** Compuesto por dos reactores, donde el primero se caracteriza por tener un tiempo de retención alto, donde pueda favorecer la etapa de hidrólisis. Este está seguido de un reactor con un bajo tiempo de retención que digiere los ácidos producidos en la primera etapa<sup>41</sup>.

Son dos reactores en serie, en los cuales se llevan a cabo las fases de acidogénesis y metalogénesis, respectivamente, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al que correspondería a un solo reactor. La separación se da mediante diferencia de velocidades donde se controla el tiempo de retención de cada reactor<sup>42</sup>.

**1.3.2 Tipos de operación.** También es importante conocer los tres tipos de operación de reactores que se pueden trabajar y los cuales se mencionan a continuación<sup>43</sup>:

**1.3.2.1 Reactor Continuo.** Este reactor se caracteriza por tener una alimentación y salida de efluente continuo. Es utilizado para instalaciones de tipo industrial donde la producción de biogás será mayor.

<sup>41</sup> CAMPOS, Elena, ELÍAS CASTELLS, Xavier, y FLOTATS, Xavier. Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Madrid, ES: Ediciones Díaz de Santos, 2012. p. 628.

<sup>42</sup> *Ibíd.*, P. 628.

<sup>43</sup> MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Op. Cit., p.89-91.

**1.3.2.2 Reactor Semicontinuo.** Se caracteriza por ser alimentado regularmente cada determinado tiempo y a medida que se carga, se retira el efluente del sistema con un valor igual al volumen alimentado.

**1.3.2.3 Reactor Tipo Batch.** Tiene un funcionamiento por ciclos, en donde cada ciclo se va a dividir en cuatro etapas que se dan durante todo el proceso las cuales son: etapa de alimentación en donde la materia orgánica se adiciona al reactor, etapa de reacción la cual tiene un tiempo variable y es en donde ocurre la degradación de la materia orgánica, etapa de sedimentación donde la biomasa se decanta (lodos) y por último etapa de descarga donde el efluente es retirado del reactor.

## 1.4 PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

**1.4.1 Biogás.** Es una mezcla gaseosa originada por la descomposición microbológica de la materia orgánica en ausencia de aire<sup>44</sup>, es importante tener en cuenta el sustrato utilizado para la digestión anaerobia ya que la composición del biogás dependerá de las características de este, en la tabla 2 se muestran las características generales del biogás:

**Tabla 2.** Características generales del biogás

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BIOGÁS</b>	
Composición	55-70% Metano 30-45% dióxido de carbono Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0-6.5 kW h 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 CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión Crítica	74-88atm
Temperatura Crítica	-82.5 °C
Densidad normal	1.2 kg m <sup>-3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol <sup>-1</sup>

**Fuente:** Deublein, Dieter and Steinhauser, Angelika. Biogas from waste and renewable resources. Wiley –VCH, 2008. p. 50.

<sup>44</sup> CARO MARTÍNEZ, Angela Lizeth. Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás a nivel de planta piloto a partir de residuos orgánicos generados en el frigorífico BLE LTDA. Bogotá D.C. 2014. p. 35-36.

**1.4.1.1 Componentes principales del biogás.** El biogás se compone de diferentes gases y según el contenido de estos tendrá un efecto o consecuencia en las características del biogás, en la tabla 3 se muestran los componentes comunes del biogás y algunas impurezas presentes con los efectos que se pueden presentar.

**Tabla 3.** Componentes comunes e impurezas presentes en el biogás.

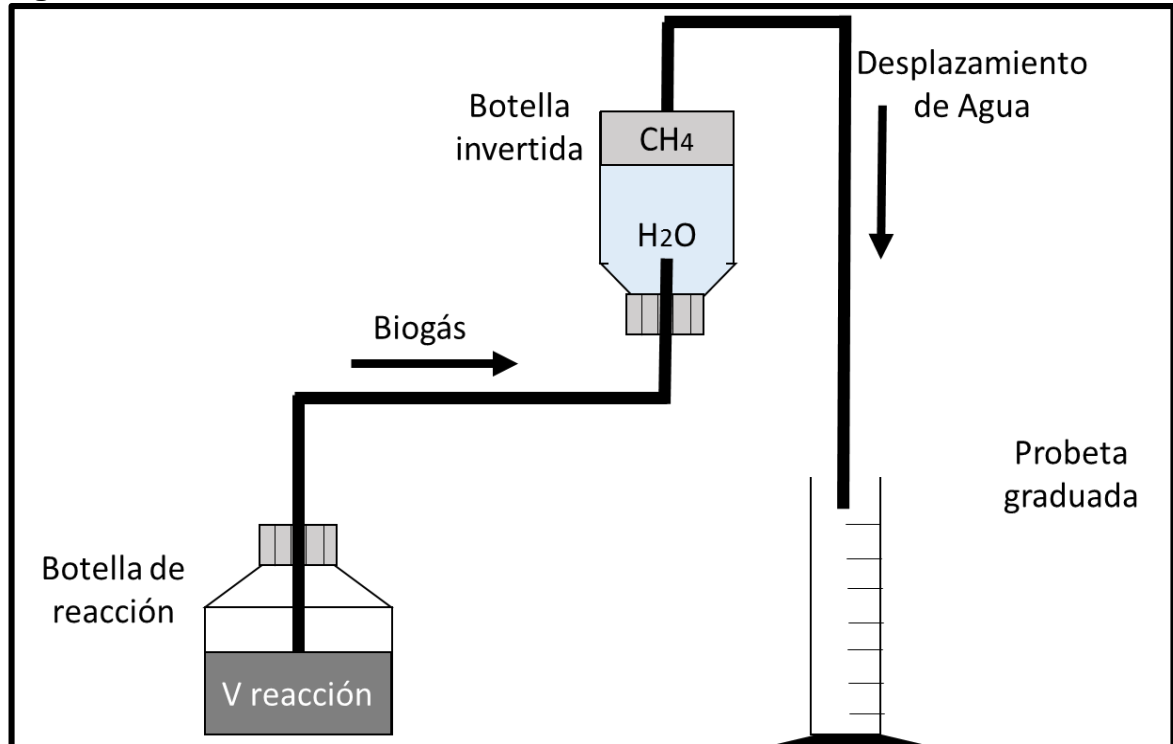
<b>COMPONENTE</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>EFEECTO</b>
$CO_2$	25 -50% en volumen	Disminuye el poder calorífico. Causa Corrosión si el gas se humedece (ácido carbónico en baja concentración). Daña Celdas de combustible alcalinas.
$H_2S$	0-0,5% en volumen	Efecto corrosivo en equipos y sistemas de tuberías (fatigas por corrosión): muchos establecen un límite de 0,05 en volumen. Emisiones de $SO_2$ después de los quemadores o emisiones de $H_2S$ cuando la combustión es incompleta- límite máximo es 0,1% en volumen.
$NH_3$	0-0,05% en volumen	Emisiones de $NO_x$ dañan las células de combustibles. Incrementa las propiedades antidetonantes de los motores.
Vapor de Agua	1-5% en volumen	Causa corrosión en sistemas de tuberías y equipos. La condensación daña instrumentos. Riesgo de congelamiento en tuberías y boquillas en países fríos.
Polvo	$> 5\mu$	Bloquea boquillas y celdas de combustible.
$N_2$	0-5% en volumen	Disminuye el poder calorífico. Incrementa las propiedades antidetonantes de los motores.
Siloxanos	0-50% $mg/m^3$	Actúa como abrasivo y daña motores.

**Fuente:** Adaptado de Deublein, Dieter and Steinhäuser, Angelika. Biogas from waste and renewable resources. Wiley –VCH. 2008. p. 52.

**1.4.1.2 Medición del biogás.** Para determinar la producción de biogás se utiliza el método de medición volumétrica y para cuantificar la calidad del gas, la cromatografía de gases.

La medición volumétrica requiere un montaje como el mostrado en la figura 5, en donde la botella de reacción corresponde al biodigestor, este es conectado por medio de mangueras a una botella invertida que contiene agua destilada y en la cual, a medida que se produzca biogás, este ingresará a la botella y desplazará el agua hacia la probeta, ocupando un volumen determinado en la botella que será igual al volumen de agua contenido en la probeta; de esta forma se conoce la cantidad de biogás producido a lo largo del proceso.

**Figura 5.** Método volumétrico.



**Fuente:** Adaptado de Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales.<sup>45</sup>

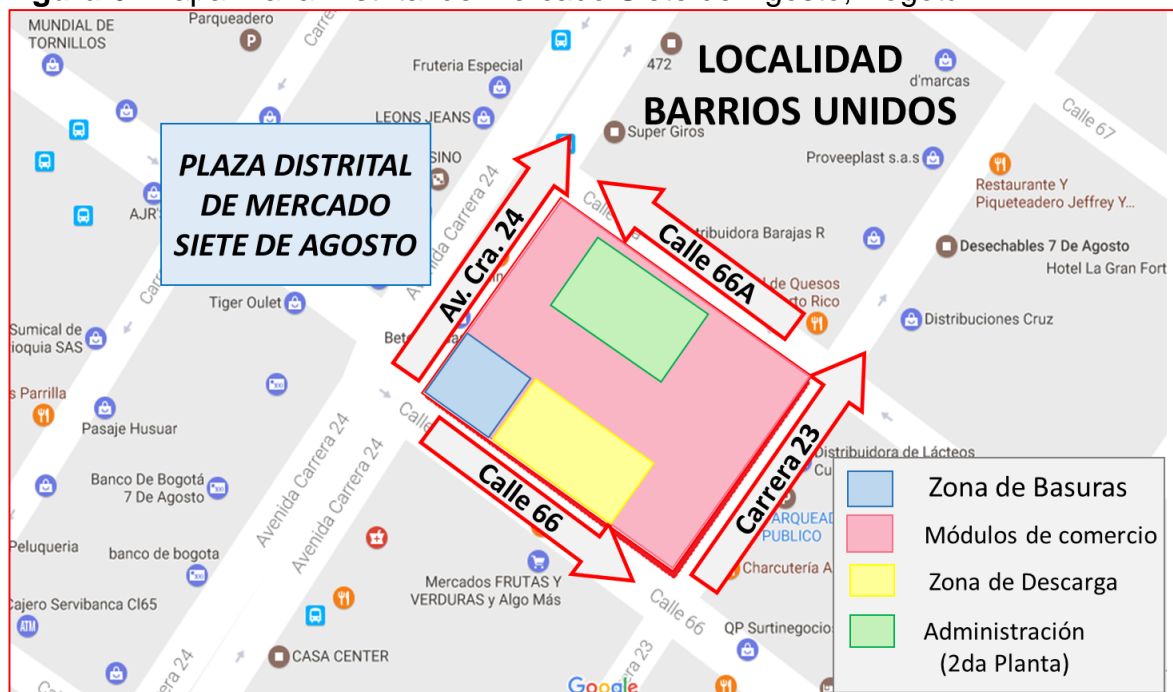
<sup>45</sup> TORRES LOZADA, Patricia y PÉREZ, Andrea. Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. En: EIDENAR. Cali. Diciembre de 2010, no. 9, p. 5-15.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

### 2.1 PLAZA DISTRTAL DE MERCADO SIETE DE AGOSTO

La Plaza Distrital de Mercado (PDM) Siete de Agosto se ubica en la calle 66 #23-30 en la localidad Barrios Unidos en Bogotá, como se muestra en la figura 6. Es administrada por el Instituto para la Economía Social (IPES) y tiene una jornada de apertura al público de domingo a domingo de 6:00am hasta las 2:00pm los días jueves, domingos y festivos y hasta las 4:00pm para el resto de la semana.

**Figura 6.** Mapa Plaza Distrital de Mercado Siete de Agosto, Bogotá.



**Fuente:** Adaptado de Google Maps.

Actualmente la PDM Siete de Agosto consta de 275 módulos de comercio de productos como frutas, verduras, hortalizas, legumbres, artesanías y la sección de fruterías y restaurantes, los cuales generan una cantidad de residuos de todo tipo, destacando los residuos orgánicos.

### 2.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS

La plaza genera una cantidad de R.O que se registra en la tabla 4 para el primer trimestre del año 2017, en kilogramos y toneladas, además se realizó una estimación mensual y anual de ésta utilizando el promedio triangular.



**Tabla 4.** Generación de R.O de la plaza de mercado Siete de agosto en los meses julio y septiembre de 2016 y enero de 2017.

MES	RESIDUOS ORGÁNICOS (kg)	RESIDUOS ORGÁNICOS (ton)
Enero	47,564	47.56
Febrero	38,123	38.12
Marzo	36,984	36.75
Estimación diaria	1,363	1.36
Estimación mensual	40,890	40.89
Estimación anual	490,684	490.68

**Fuente:** Seguimiento a la gestión de residuos sólidos aprovechables generados en los equipamientos a cargo del Instituto para la Economía Social (IPES)

Como se observa en la tabla 4, la generación de R.O varía mensualmente según los reportes del IPES. La estimación mensual es de 40,890kg R.O y, al comparar estos datos con los obtenidos del Programa para la gestión de los residuos sólidos orgánicos para la ciudad de Bogotá D.C.<sup>46</sup> del año 2010, se encuentra un incremento del 78%, pues allí se reportan 22,942kg R.O mensuales generados por la PDM Siete de Agosto. Con lo anterior, se reafirma la necesidad de un sistema que aproveche el incremento en la generación de R.O y mitigue el impacto ambiental que estos ocasionan.

En la ilustración 1, se muestra el registro fotográfico de un sector de la PDM.

**Ilustración 1.** PDM Siete de Agosto.



**Fuente:** La Lista. Siete de Agosto. [En Línea] <http://lalista.co/7-de-agosto/>. Citado el día 23 de Marzo de 2017.

<sup>46</sup> UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE SERVICIOS PÚBLICOS. Programa para la gestión de residuos sólidos orgánicos para la ciudad de Bogotá, D.C. Bogotá D.C. 2010. p. 55 -78.

### 2.3 SISTEMA DE RECOLECCIÓN

Los R.O son generados por cada módulo de la plaza, los cuales se componen principalmente de alimentos en descomposición no aptos para su venta y cáscaras de frutas y verduras como: restos de lechuga, repollo, yuca, hojas de maíz, cebolla, fresas, mangos, hierbas, cáscaras de banano, naranja, papa, arveja, uchuva, entre otros.

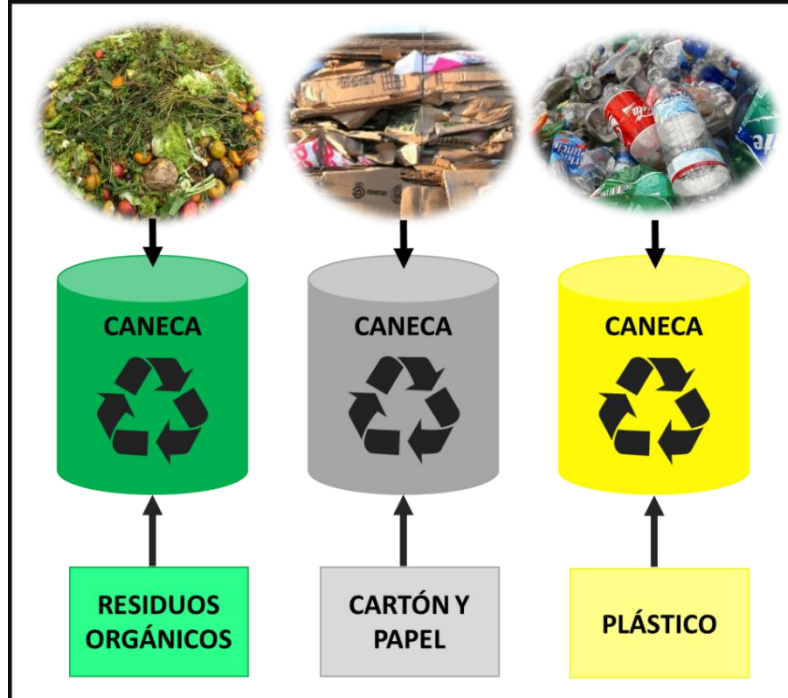
El sistema de recolección consiste en llenar diariamente entre 15 y 25 canecas exclusivamente de residuos orgánicos. Éstas se recogen durante el día tras varios recorridos que hace la persona encargada del aseo por toda la plaza hasta el cierre de la jornada laboral y finalmente son almacenadas en el cuarto de basuras como se muestra en la ilustración 2.

**Ilustración 2.** Cuarto de basuras Plaza de Mercado del Siete de Agosto.



La plaza de mercado cuenta con canecas de diferentes colores para identificar el tipo de residuo depositado como se muestra a continuación en la figura 7.

**Figura 7.** Clasificación de residuos por colores.



## 2.4 MUESTREO DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Para llevar a cabo la producción de biogás a escala laboratorio se escogió realizar un muestreo aleatorio por conglomerados para las canecas de R.O (verdes) seguido de la ejecución del método de cuarteo. Este método se eligió ya que según el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia<sup>47</sup>, el método de cuarteo debe utilizarse para el muestreo de residuos orgánicos que son recolectados y apilados, como es el caso de la PDM Siete de Agosto que recolecta los R.O en diferentes canecas.

Se realizaron 3 muestreos, el primero durante una semana desde el 27 de enero hasta el 2 de febrero. Se seleccionaron 5 canecas diarias y el tamaño de muestra por día fue en promedio de 2 kg, para un total de aproximado de 14kg. El segundo y tercer muestreo fue durante un día, 7 de marzo y 27 de abril, respectivamente, llevando a cabo el mismo proceso de selección de 5 canecas con un tamaño de muestra promedio de 3kg para un total aproximado de 15kg.

El pretratamiento consistió en cortar con un cuchillo la muestra para reducir el tamaño de partícula a alrededor de 1cm y permitir su homogenización como se muestra en la ilustración 3. Posteriormente, se almacenó en un refrigerador para mantener los residuos a una temperatura de 3°C y preservar los microorganismos

<sup>47</sup> MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, Anexo C. Bogotá, D.C., 2008. p. 147-148.

presentes en la materia orgánica que son indispensables para la digestión anaerobia y evitar su degradación antes de iniciar el montaje experimental. El diseño del plan de muestreo se encuentra en el ANEXO G.

**Ilustración 3.** Muestra de R.O cortados.



## 2.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO

De cada muestra recolectada de R.O de la plaza, se seleccionó 1kg empleando el método de cuarteo para obtener una muestra representativa, y se realizó el Análisis de Materiales Orgánicos del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos, para las tres muestras analizadas, de humedad, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas en base húmeda (BH). La muestra 1 corresponde a la fecha de 27 de enero al 2 de febrero, la muestra 2 al 7 de marzo y la muestra 3 al 27 de abril. En el ANEXO H se encuentran los resultados completos de las 3 caracterizaciones.

**Tabla 5.** Caracterización del material orgánico.

<b>VARIABLE</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
<b>Humedad (%)</b>	86.04	88.11	94.22
<b>Sólidos totales (%ST)</b>	13.96	11.89	5.78
<b>Sólidos volátiles (%SV)</b>	11.88	10.23	4.75
<b>Cenizas</b>	2.08	1.66	1.03

**Fuente:** Adaptado de Resultados Análisis de materia orgánica, Centro de Biosistemas UTadeo. (ANEXO H).

A partir de la tabla 5 se encuentra que la humedad de la muestra es mayor a la esperada según la consulta bibliográfica, pues se afirma que R.O de frutas y verduras contienen una humedad entre 79,61%<sup>48</sup> y 80,46%<sup>49</sup>. Adicionalmente se encontró variación en la cantidad de sólidos volátiles ya que se esperaba 18.80%<sup>50</sup> en base húmeda. Estos parámetros serán importantes para la selección de variables a controlar y evaluar durante la producción de biogás.

Cabe resaltar que el Centro de Bio-Sistemas reporta resultados solo de humedad y cenizas, por lo tanto, para determinar el contenido de sólidos totales y volátiles se realizó un cálculo matemático, con los datos en base húmeda, que consistió en las siguientes diferencias:

$$\%ST \rightarrow 100\% - \%Humedad$$

$$\%SV \rightarrow \%ST - \%Cenizas$$

## 2.6 ESTIMACIÓN PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Para la estimación de producción de biogás para los residuos generados por la PDM, se debe partir del porcentaje de SV de la muestra, la cual corresponde a 4.75% en base húmeda. Se selecciona el resultado de la muestra 3 ya que con ésta se desarrolló el montaje experimental de la digestión anaerobia. Con este parámetro definido y tomando como referencia la tabla 24 mostrada en el ANEXO B, Producción de biogás y metano para cada tipo de sustrato, se promedian los resultados obtenidos para la producción de biogás a partir de frutas y verduras allí mostrados, esperando así una producción de biogás de 388mL/gSV.

Partiendo de lo anterior es posible determinar el potencial de producción de biogás de acuerdo a la cantidad de R.O generados por la PDM Siete de Agosto y las plazas de mercado de Bogotá como se muestra en la tabla 6. En el ANEXO I, se presenta una muestra de cálculos para determinar el potencial de producción de biogás en condiciones normales.

**Tabla 6.** Estimación producción de biogás PDM Siete de Agosto y Plazas de mercado de Bogotá.

<b>Plaza de Mercado</b>	<b>Potencial de producción de biogás (mL/mes)</b>	<b>Potencial de producción de biogás (m<sup>3</sup>/mes)</b>
Siete de Agosto	1.42x10 <sup>9</sup>	1,420
Plazas de Mercado de Bogotá	72.232x10 <sup>9</sup>	72,232

<sup>48</sup> LÓPEZ MÁRTINEZ, Germán A. Op. cit., p. 19.

<sup>49</sup> PAVI, Suelen, et al. Op. Cit., p. 363.

<sup>50</sup> Ibíd. p. 363.

Según la tabla 6, la producción de biogás estimada es de 1,420m<sup>3</sup>/mes y 72,232m<sup>3</sup>/mes para la PDM Siete de Agosto y las plazas de mercado de Bogotá respectivamente, encontrando así un gran potencial para el tratamiento de R.O por digestión anaerobia que actualmente no se está aprovechando y por el contrario se está perdiendo la oportunidad de desarrollar nuevas tecnologías como ésta.

Es importante tener en cuenta que la producción de biogás se puede ver afectada por la presencia de cáscaras las cuales contienen lignina, ya que ésta proporciona rigidez a las células y mantiene unidas las fibras de los polisacáridos impidiendo así su degradación<sup>51</sup>, una solución a este problema consiste en realizar un pretratamiento del sustrato y reducir el tamaño de partícula, ya que la producción de metano es inversamente proporcional al tamaño de ésta, a menor tamaño, los microorganismos pueden tener un mejor acceso a los nutrientes que contiene el sustrato, lo que facilita la transferencia de masa, aumenta la velocidad de hidrólisis y con ello mejora el rendimiento del proceso<sup>52</sup>. Igualmente para procesos donde se utilice inóculo, se debe realizar una reducción del tamaño de partícula para evitar que éste quede compacto, pues estudios indican que este pretratamiento aumenta en un 20% la producción de biogás<sup>53</sup> a partir de estiércol.

---

<sup>51</sup> MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011. p. 21.

<sup>52</sup>VARGAS LEGUIZAMÓN, Carol Viviana, Zambrano Garcia, Carlos Mauricio. Estudio del efecto de tamaño de partícula de bagazo de fique en la producción de biogás. Bucaramanga, 2010. p.16

<sup>53</sup> *Ibíd.*, p.17

### 3. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La producción de biogás se realizó a escala laboratorio. Las variables controladas al inicio del experimento fueron el contenido de sólidos totales, con el fin de evaluar su influencia y determinar condiciones óptimas para el material de carga del biodigestor, y la adición o no de inóculo, utilizado como iniciador del proceso por su aporte de carga microbiana.

Por otro lado, la temperatura se fijó a 35°C, pues según la tabla 24 mostrada en el ANEXO C, Condiciones de temperatura trabajadas en artículos y tesis, ésta es la temperatura con la cual se tiene un mejor desempeño por parte de los microorganismos para la digestión anaerobia, ya que un rango mesófilo brinda las condiciones adecuadas para el crecimiento y reproducción de estos. Además permite controlar más fácil el proceso a diferencia de las condiciones psicrófilas y termófilas<sup>54,55</sup>. Adicionalmente se fijó un entorno anaerobio (ausente de oxígeno) dentro del biodigestor inyectándole gas nitrógeno<sup>56</sup> y sellándolo herméticamente.

Finalmente, se realizó la medición de producción de biogás diariamente y el monitoreo de pH y temperatura cada 5 días durante los 30 días del proceso de digestión anaerobia.

#### 3.1 SELECCIÓN VARIABLES DE PROCESO

**3.1.1 Adición de inóculo.** El primer parámetro a evaluar es la adición o no de inóculo (estiércol bovino fresco) ya que como se menciona en la sección 1.2.9, Factores que afectan la digestión anaerobia, se afirma que el estiércol aporta microorganismos esenciales para la degradación biológica del sustrato permitiendo la reducción del tiempo de retención en el biodigestor y aumentando la cantidad y calidad del biogás<sup>57</sup>.

Según la ENTREVISTA con Mabel Juliana Quintero Silva, Docente de Microbiología Industrial de la Universidad Industrial de Santander, Bogotá, 13 de Marzo de 2017, y autores como: PARRA OROBIO, Brayan Alexis, et al.<sup>58</sup>, RAPOSO, F., et al.<sup>59</sup> y

---

<sup>54</sup> MAO, Chunlan, et al. Review on research achievement of biogas from anaerobic digestion. En: ELSEVIER. vol. 45, p. 540-555.

<sup>55</sup> KONDUSAMY, Dhamodharan y KALAMDHAD, Ajay S. Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production-A Review. En: ELSEVIER. vol. 2, p. 1821-1830.

<sup>56</sup> ORJUELA CASTAÑO y VILLARAGA VALERO. Op. Cit., p. 40.

<sup>57</sup> ALZATE MONCADA y QUINTERO SILVA. Op. Cit., p. 120.

<sup>58</sup> PARRA OROBIO, Brayan Alexis, et al. Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. En: INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN y TECNOLOGÍA. vol. 16, p. 515-526.

<sup>59</sup>RAPOSO, F., et al. Influence of Inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. En: CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. vol. 149, p. 70-77.

MOLINA TIRADO, Kevin Giovanni, et al.<sup>60</sup>, se concluye que la adición de inóculo es un parámetro importante para iniciar el proceso y que de la relación I:S dependerá el éxito de éste, se fija una relación inóculo-sustrato (I:S) de 3:1 basada en la cantidad de sólidos volátiles en gramos.

Para la obtención del inóculo, se realizaron tres recolecciones diferentes (igual que para los R.O de plaza), los días 17 de febrero, 17 de marzo y 29 de abril, cada una de éstas fueron de aproximadamente 4kg de estiércol bovino fresco y húmedo donado por el Frigorífico Guadalupe S.A.S ubicado en el sur de Bogotá. En la ilustración 4 se muestra uno de los tanques de almacenamiento de estiércol del frigorífico.

**Ilustración 4.** Estiércol bovino fresco.



De cada muestra se seleccionó 1kg y se envió a análisis de materia orgánica por el Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano y los resultados de humedad, ST, SV y cenizas en base húmeda se muestran a continuación en la tabla 7 para las 3 muestras. Los resultados completos de las 3 caracterizaciones de estiércol bovino se encuentran en el ANEXO J.

**Tabla 7.** Caracterización de estiércol bovino.

<b>VARIABLE</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
<b>Humedad (%)</b>	73.02	79.13	76.18
<b>Sólidos totales (%ST)</b>	26.98	20.87	23.82
<b>Sólidos volátiles (%SV)</b>	21.62	16.70	18.99
<b>Cenizas</b>	5.36	4.17	4.83

**Fuente:** Adaptado de Resultados Análisis de materia orgánica, Centro de Biosistemas UTadeo. (ANEXO J)

<sup>60</sup> MOLINA TIRADO, Kevin Giovanni, et al. Determinación a escala de laboratorio la relación Sustrato/Inóculo en la biodigestión de residuos orgánicos de la Universidad EAFIT. En: ENCUENTRO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN EN INGENIERÍA ACOFI.



Como se puede observar en la tabla 7, la humedad que presenta el estiércol varía dentro de un rango de 73-79%, levemente diferente al rango esperado entre 70%<sup>61</sup> y 75%<sup>62</sup>; el incremento de la humedad pudo ser causado por la época de lluvias en Bogotá, pues en el Frigorífico Guadalupe S.A.S los corrales para el ganado bovino se encuentran expuestos al medio ambiente como se muestra en la ilustración 5, causando así la mezcla de agua lluvia y estiércol. Por otro lado el contenido de SV se encuentra entre 16-21%, que al compararlo con los resultados (Tabla 5) para R.O que varía entre 4-11%, se encuentra factible la mezcla de sustratos con el fin de aumentar el contenido de sólidos volátiles y así la producción de biogás.

**Ilustración 5.** Corrales ganado bovino, Frigorífico Guadalupe S.A.S.



**3.1.2 Cantidad de sólidos totales.** El contenido de sólidos totales es un factor influyente en la producción de biogás ya que un aumento en la cantidad de sólidos totales de 10% a 15% en reactores tipo batch, disminuye la cantidad de metano en el biogás producido<sup>63</sup>.

El contenido de ST en el biodigestor se evalúa a 2 condiciones, que de acuerdo a autores como ORJUELA CASTAÑO y VILLARRAGA VALERO<sup>64</sup> y la ENTREVISTA con Mabel Juliana Quintero Silva, Docente de Microbiología Industrial de la

<sup>61</sup> ORJUELA CASTAÑO y VILLARRAGA VALERO. Op. Cit., p. 91.

<sup>62</sup> BERNAL VÉLEZ, Daniela y QUINTERO GARZÓN, Daniela. Desarrollo De Una Propuesta Para La Mejora De Un Modelo De Biodigestor Anaerobio Convencional a Escala Banco a Partir De Una Mezcla De Residuos Bovinos y Lodos En La Finca El Recodo De Tabio, Cundinamarca. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2016. p. 35.

<sup>63</sup> ORJUELA CASTAÑO y VILLARRAGA VALERO. Op. Cit., p. 22-23.

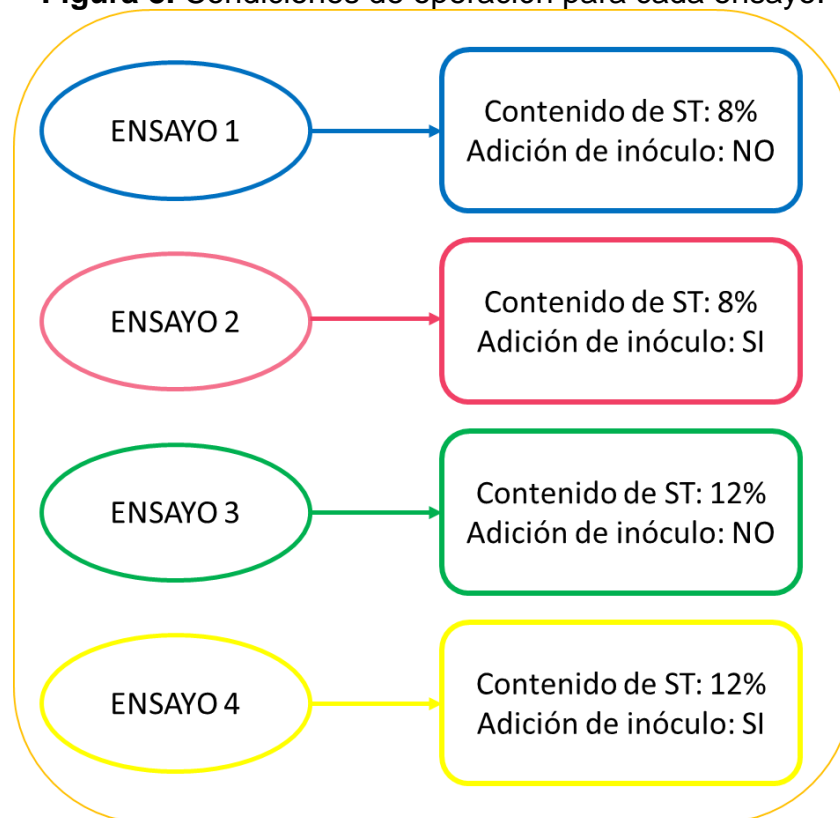
<sup>64</sup> *Ibíd.* p. 22-23.

Universidad Industrial de Santander, Bogotá, 13 de Marzo de 2017, se definieron como 8% y 12% ya que para reactores tipo batch, éste es el rango adecuado para que la producción de biogás sea exitosa.

### 3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

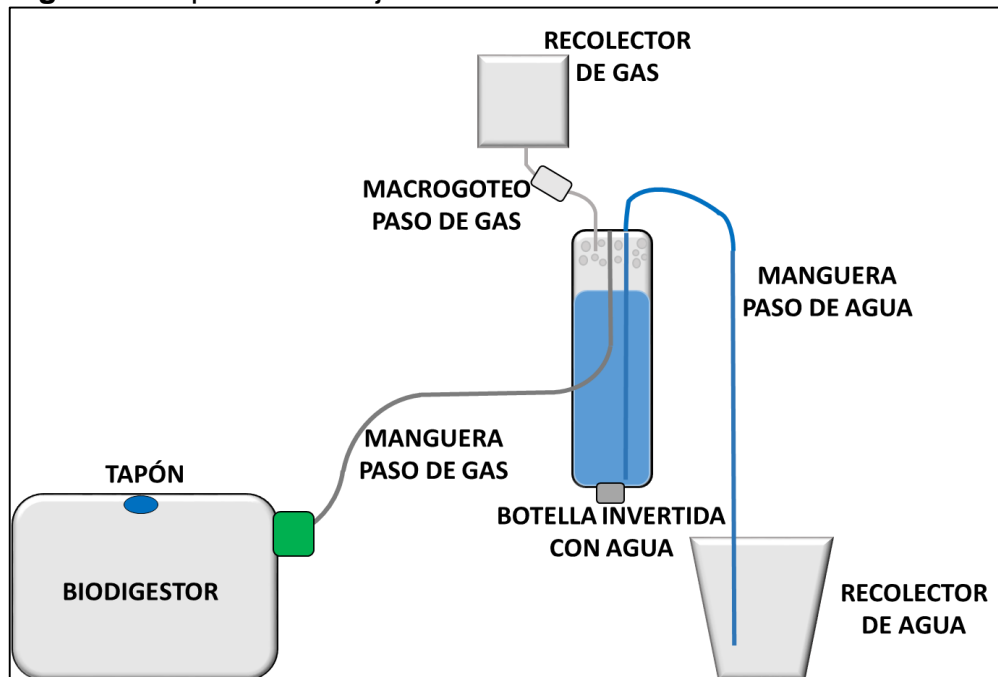
El desarrollo de la digestión anaerobia consta de 4 ensayos, con 2 réplicas cada uno. Las condiciones de operación se muestran en la figura 8.

**Figura 8.** Condiciones de operación para cada ensayo.



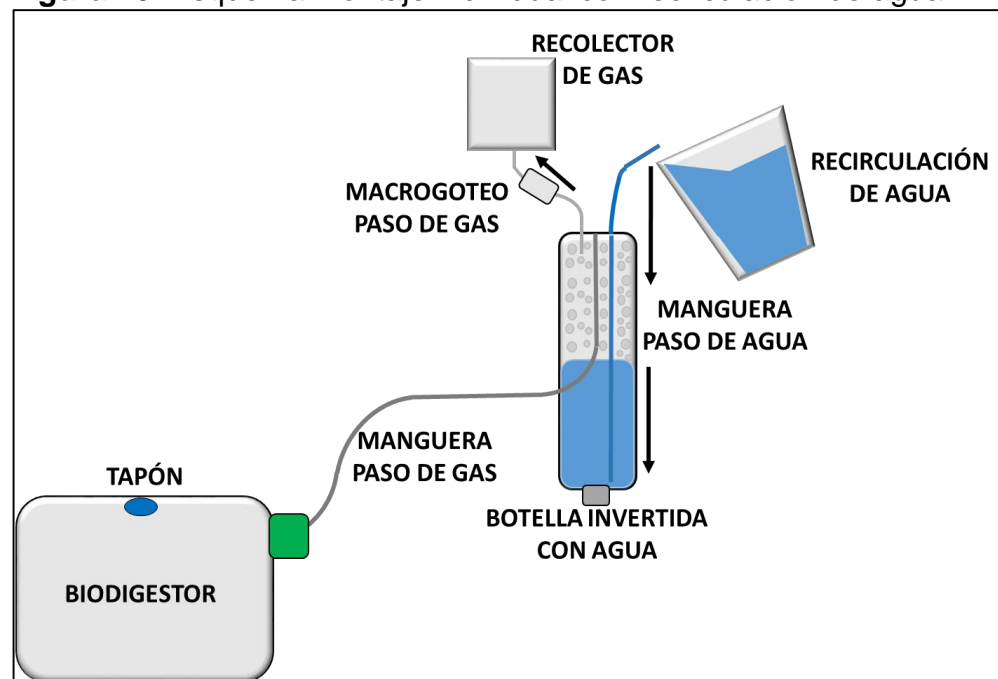
**3.2.1 Montaje individual.** El montaje experimental para un solo biodigestor con sus respectivas conexiones se muestra en la figura 9. Consta de un biodigestor de polietileno conectado por medio de una manguera a una botella invertida de polietileno con agua destilada (utilizada para el método volumétrico) la cual a su vez, está conectada a una manguera que permite el desplazamiento del agua a medida que se produce el gas, y a un macrogoteo que permite el paso del gas para ser recolectado. El biodigestor cuenta con un tapón de caucho en la parte superior para monitorear T y pH.

**Figura 9.**Esquema montaje individual.



Para hacer la recolección del gas es necesario recircular el agua a la botella invertida y así ejercer una presión en el sistema haciendo que el gas se desplace por el macrogoteo hasta el recolector de gas y evitar la entrada de oxígeno a éste (figura 10).

**Figura 10.** Esquema montaje individual con recirculación de agua.



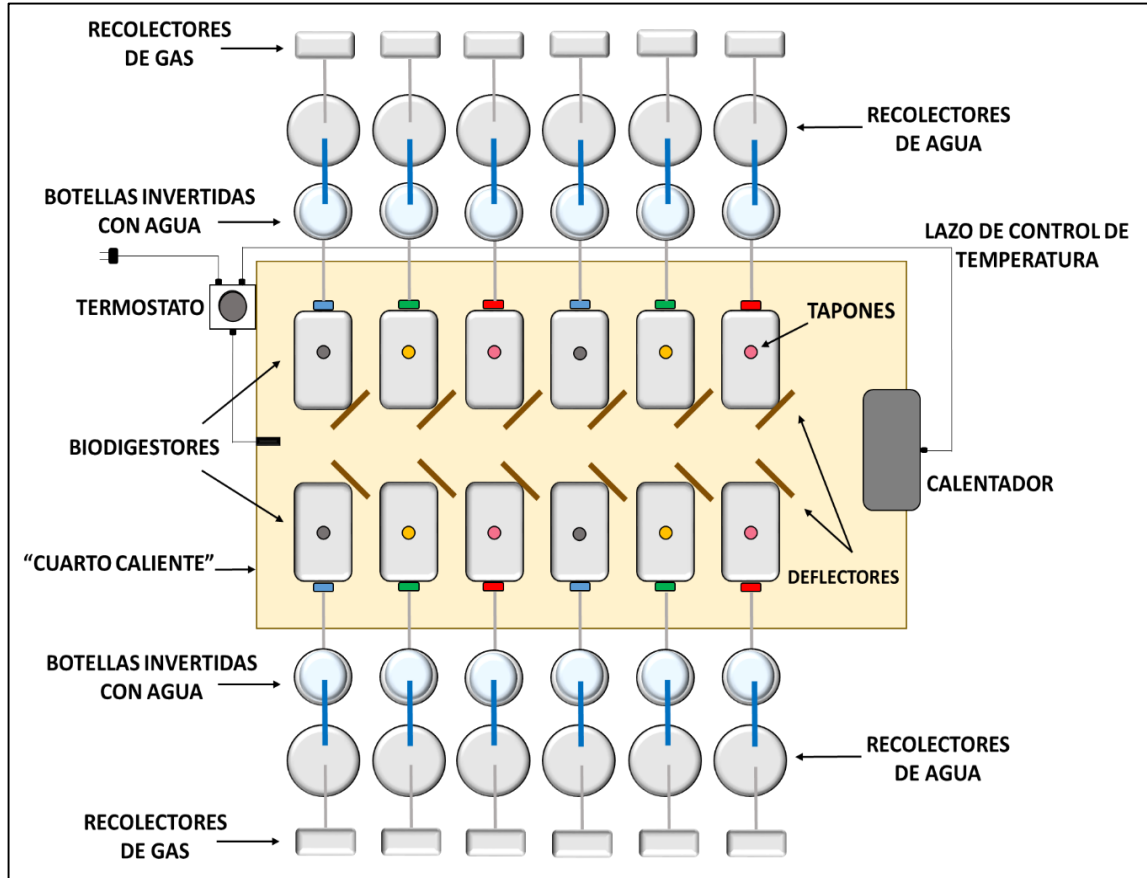
**3.2.2 Montaje colectivo.** El montaje experimental completo, consta de doce garrafas de polietileno de un volumen de 2L (biodigestores) con una pequeña perforación que tiene un tapón de caucho para monitorear temperatura y pH cada 5 días. El biodigestor se conecta por medio de una manguera a un envase cilíndrico de polietileno de 1L que contiene agua destilada, la cual se utiliza para desarrollar el método volumétrico y cuantificar la producción de biogás mediante el desplazamiento del agua por una manguera gracias a la presión que ejerce el gas producido.

Para la recolección del gas, se tienen 12 macrogoteos, conectados a bolsas vacías de agua destilada, que permanecen con el paso de fluido bloqueado hasta el día de recolección del gas.

Una vez conectado el sistema, se ajusta la temperatura a 35°C para todos los biodigestores. Para lograr una temperatura que no tenga una variación mayor a 5°C se implementa un sistema de calentamiento por medio de un “cuarto caliente” el cual se crea con una caja de cartón (para reducir la transferencia de calor con el ambiente externo y mantener aislado el sistema) y un sistema de control de temperatura que consta de un calentador de ambiente marca SAMURAI modelo SO2020 Sprinto, conectado a un termostato marca RAINBOW con una escala de medición de temperatura de 0°C a 90°C.

El sistema de control de temperatura permitirá o impedirá el paso de corriente eléctrica según la temperatura que detecte en el ambiente. Para evitar puntos calientes dentro de los biodigestores y homogenizar la transferencia de calor por convección entre el aire caliente y los biodigestores, se usan deflectores en medio de la caja, los cuales crean un flujo de aire constante dentro de ésta y los biodigestores logran mantener su temperatura en el rango estimado. En la figura 11, se puede observar el montaje completo para los 12 ensayos incluyendo el sistema de control de temperatura.

**Figura 11.** Esquema colectivo del montaje experimental.

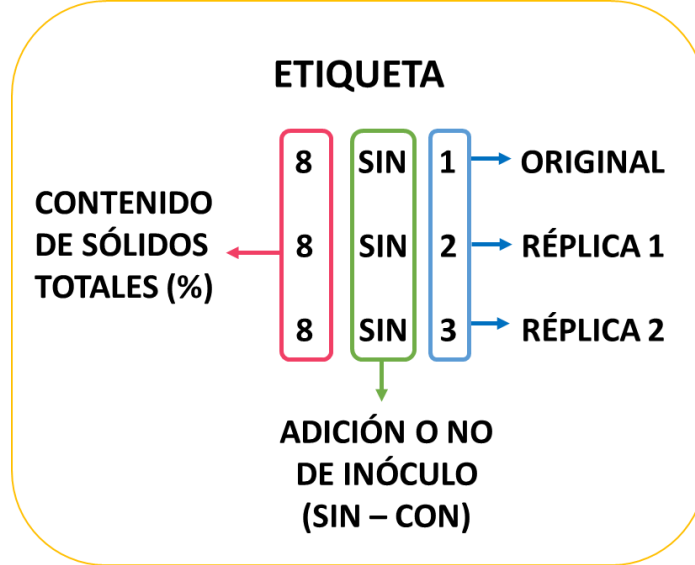


En el ANEXO K se muestra el registro fotográfico del experimento a escala laboratorio realizado para este proyecto.

### 3.3 MATERIAL DE CARGA

El material de carga se determinó con base en las caracterizaciones de inóculo y R.O. Sin embargo, el tiempo de entrega de resultados, por el Centro de Biosistemas, es de 12 días hábiles, razón por la cual se supusieron los parámetros de humedad y SV antes de dar inicio al montaje experimental. Esta estimación varió significativamente con respecto a los valores reales, por lo tanto se realizaron 3 experimentos diferentes explicados a continuación. En donde 2 de ellos se consideraron pre-experimentaciones y el definitivo es el montaje experimental 3. La etiqueta que representa cada ensayo y su réplica se presenta en la figura 12.

**Figura 12.** Ejemplo de etiqueta para cada ensayo.



Se esperaba un contenido de 8 y 12% ST y una relación I:S de 3:1 y los parámetros definitivos fueron 4, 5, 7 y 10%ST y una relación I:S de 7:1. Como se esperaban dos niveles de sólidos totales y se obtuvieron cuatro, no es posible desarrollar un análisis estadístico de los resultados obtenidos ya que no se realizó el montaje experimental para todas las condiciones posibles.

**3.3.1 Montaje experimental 1.** Para el primer experimento se utilizó la muestra 1 de R.O e inóculo. Con base en la teoría se supuso para R.O, una humedad de 80%<sup>65</sup>, ST 20% y SV 18%<sup>66</sup> para determinar la carga de R.O, inóculo y agua necesaria para cumplir con el contenido de sólidos totales de 8 y 12% y una relación I:S de 3:1.

Se inició el montaje antes de obtener los resultados de la caracterización 1, haciendo los balances de materia correspondientes para determinar la cantidad de carga al biodigestor. Tras obtener los resultados mostrados en la tabla 5 y 7 para la muestra 1 de R.O e inóculo, se observó que los parámetros de humedad y sólidos volátiles cambiaron significativamente con respecto a los esperados por la teoría, obteniendo un contenido de ST de 6, 8, 9 y 14% y una relación I:S de 6:1 por lo tanto, después de 16 días de digestión a escala laboratorio se detuvo el proceso de producción de biogás y se volvió a iniciar el proceso con las recolecciones de las muestras 2.

<sup>65</sup> LÓPEZ MÁRTINEZ, Germán A. Op. cit., p. 19.

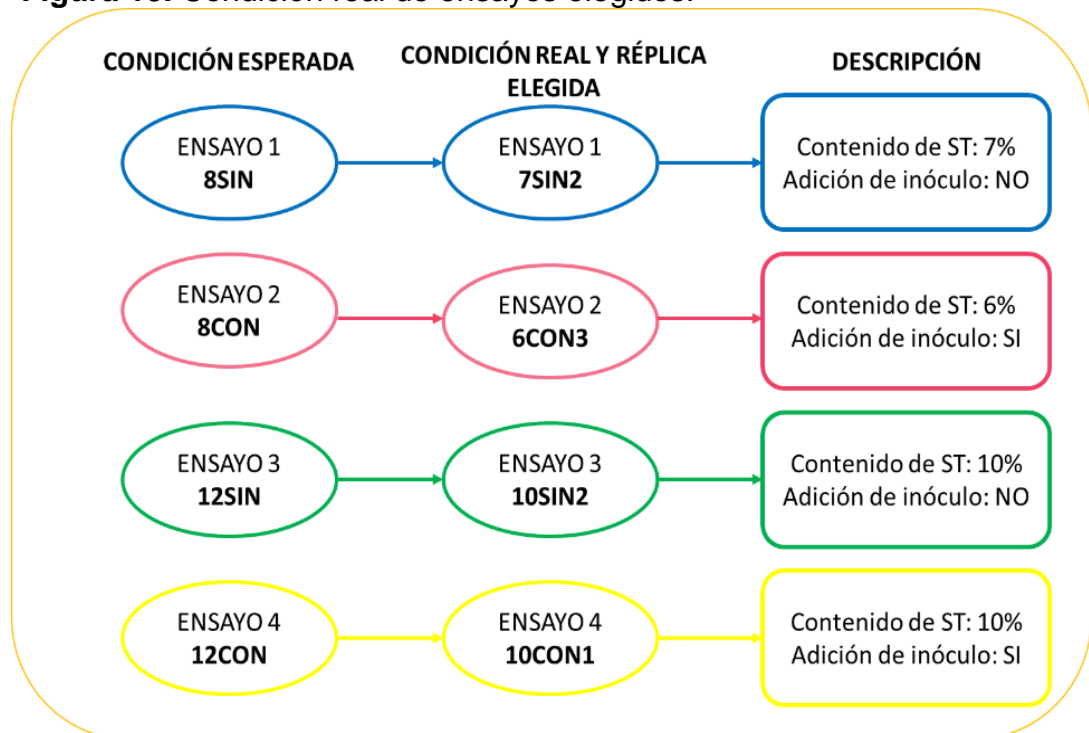
<sup>66</sup> PAVI, Suelen, et al. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. 10-01.vol. 228, p. 363.

**3.3.2 Montaje experimental 2.** Para el segundo experimento se realizó otro muestreo, el de R.O el día 7 de marzo y el de inóculo el día 17 de marzo. Se utilizó como punto de partida para determinar la carga a los biodigestores, los resultados de la muestra 1 mostrados en las tablas 5 y 7 (para R.O e inóculo). La suposición fue correcta ya que no se tuvo gran variación en humedad y SV comparado con los resultados de la muestra 2, es decir, los factores a fijar de 8 y 12% ST y relación I:S de 3:1 no variaron significativamente ya que se obtuvo un contenido de sólidos totales de 6, 7 y 10% y una relación I:S de 3:1.

La digestión anaerobia fue desarrollada durante 30 días, se realizaron 2 réplicas por cada ensayo obteniendo un total de 12. Posteriormente, se realizó la recolección de gas para cada ensayo y se llevó a la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Colombia para realizar el análisis de metano por cromatografía de gases. Sin embargo, se presentó un incidente con las bolsas usadas como recolectores de gas y se produjo la fuga y pérdida del éste impidiendo el desarrollo de la cromatografía, razón por la cual se realizó un tercer experimento.

Al realizar el tercer montaje que se explica a continuación, se decidió elegir e incluir los 4 biodigestores con mejores resultados de producción de biogás para continuar la digestión anaerobia durante 30 días más, para un total de 60, esto con el fin de observar el comportamiento del sistema durante un tiempo de retención mayor. En la figura 13 se muestran las condiciones reales de cada ensayo elegido.

**Figura 13.** Condición real de ensayos elegidos.

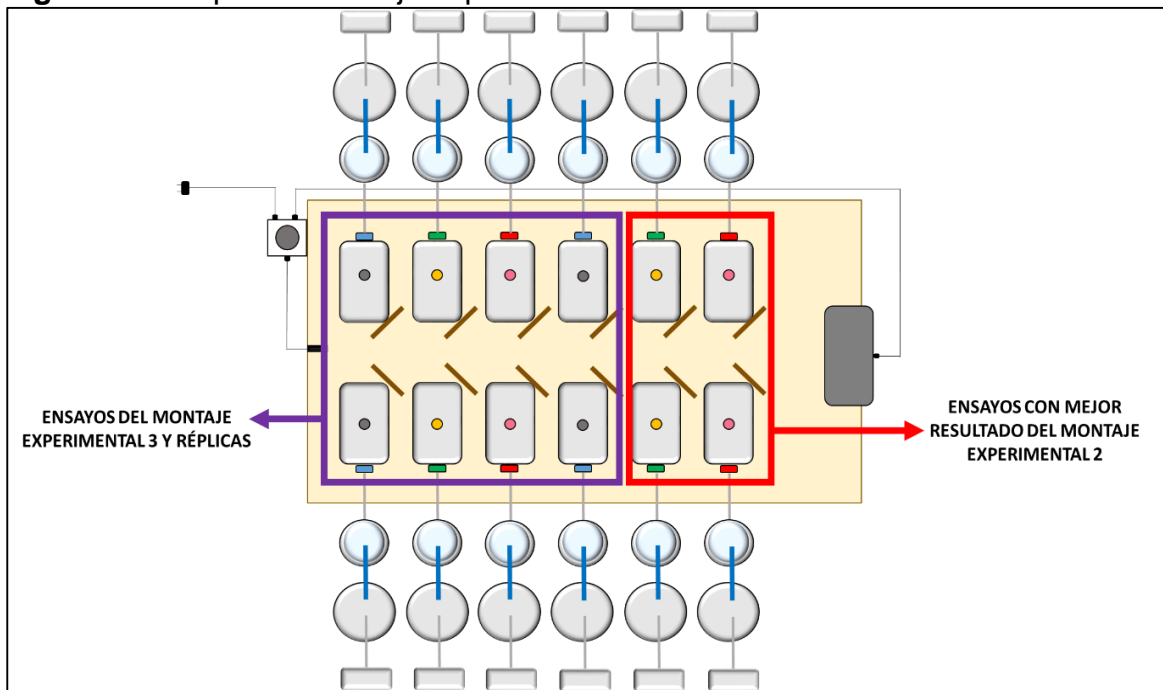


**3.3.3 Montaje experimental 3.** Finalmente, para el tercer experimento se llevó a cabo el último muestreo en las fechas 27 y 29 de abril para R.O e inóculo respectivamente.

Como punto de partida, en cuanto a las características de las muestras, se utilizó un promedio aritmético de los resultados obtenidos de las muestras 1 y 2 de R.O e inóculo. Sin embargo, como se observa en la tabla 5, la tercera caracterización de R.O (muestra 3) fue la que presentó mayor variación en sus propiedades, pues la humedad fue de 94.22%, cuando se esperaba 87.08%, y el contenido de SV fue de 4.75%, cuando se esperaba 11.06% SV. Razón por la cual las condiciones de operación de la digestión anaerobia varían con respecto a las esperadas inicialmente y se obtuvo un contenido de ST de 4, 5, 7 y 10% y una relación I:S de 7:1.

El experimento se llevó a cabo durante 30 días y a diferencia de los anteriores, se realizó solo una réplica, para un total de 8. Adicionalmente, se incluyeron los 4 ensayos con mejor resultado del montaje experimental 2, completando así 12 ensayos en total como se muestra en la figura 14.

**Figura 14.** Esquema montaje experimental 3.



**3.3.4 Condiciones de carga.** En la tabla 8 se muestran las condiciones de carga de inóculo, agua y R.O en gramos, el contenido de ST para obtener un 70% de carga del biodigestor para el montaje experimental 3. En el ANEXO L se muestran las condiciones de carga completas para los 3 montajes realizados.



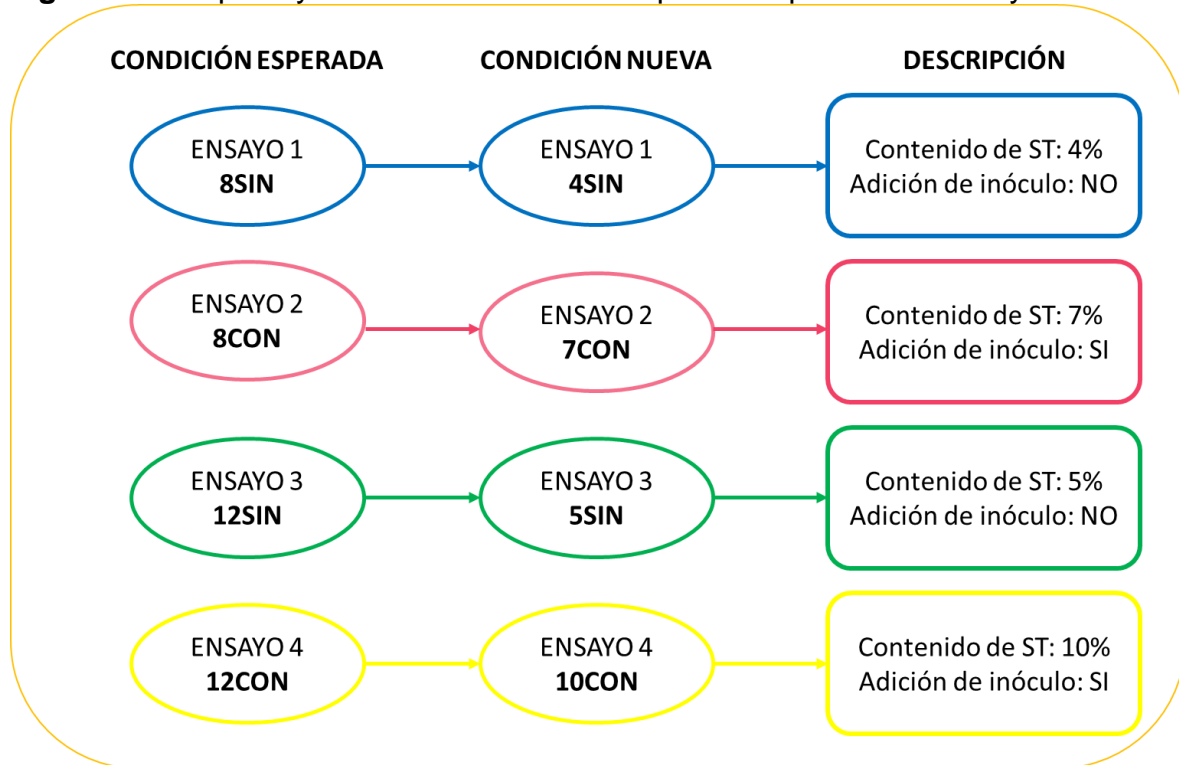
**Tabla 8.** Condiciones de carga para cada biodigestor.

<b>Etiqueta</b>	<b>%ST esp.</b>	<b>%ST real</b>	<b>Inóculo (g)</b>	<b>R.O BS (g)</b>	<b>R.O BH (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
12CON	12	10	535	39.96	309	556
8CON	8	7	357	26.64	206	837
12SIN	12	5	0	168	1300	100
8SIN	8	4	0	112	867	533

Como se observa en la tabla 8, se esperaba un contenido de sólidos totales de 12% y 8% pero debido a la variación en los parámetros de ST y SV se obtuvo contenido de sólidos de 5% y 10% para los reactores esperados con 12%ST y se obtuvo 4% y 7% para los reactores esperados con 8%ST, así que esto debe tenerse en cuenta para en análisis de los resultados de producción de biogás, cantidad y calidad de éste.

Las etiquetas para ensayo se modifican como se muestra en la figura 15 para los ensayos nuevos del montaje experimental 3.

**Figura 15.** Etiqueta y condiciones reales de operación para cada ensayo.



### 3.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA

Para llevar a cabo la digestión anaerobia a escala laboratorio, se monitoreó pH y temperatura cada 5 días y se midió la producción de gas diariamente. Los resultados completos para todos los ensayos se encuentran en el ANEXO M.

Se utilizó un pHmetro-termómetro marca METER8 que detecta un rango de pH de 3.5 – 9, un rango de temperatura de -9 a 50°C y tiene una longitud de sonda de 200mm.

**3.4.1 Comportamiento de pH.** El pH fue monitoreado cada 5 días durante los 30 días de la digestión anaerobia.

El comportamiento de pH esperado se fundamenta en cada una de las etapas de la digestión anaerobia, en donde la hidrólisis se lleva a cabo a valores de pH aproximadamente neutros, en la acidogénesis se da una disminución de pH hasta 4 y 4.5 que evidencia la formación de ácidos y así da paso a la etapa de acetogénesis y metanogénesis en la cual se retomará un pH próximo al neutro para la formación de metano<sup>67</sup>.

A continuación se muestran los resultados del comportamiento de pH para cada uno de los montajes experimentales realizados.

**3.4.1.1 Montaje experimental 1.** Como se mencionó anteriormente, este montaje fue desarrollado durante 16 días y posteriormente fue suspendido, por lo tanto se hicieron solo 4 mediciones de pH para los días 20 y 25 de febrero y 2 y 7 de marzo. Los resultados completos se encuentran en el ANEXO M.

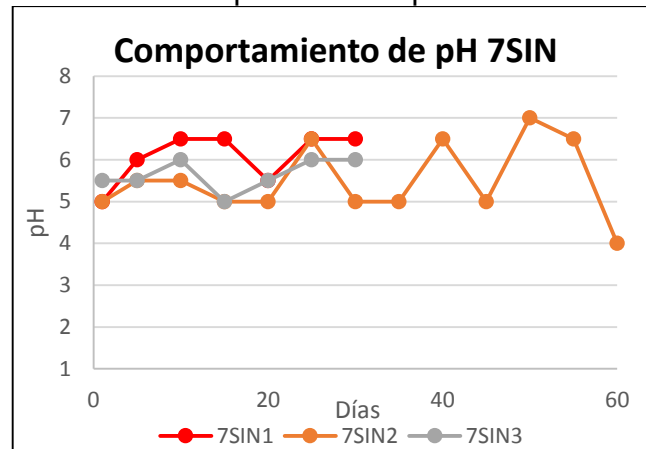
Se concluye que el pH de inicio para los ensayos se encontró entre 4 y 6, lo cual demuestra que el sistema inicia por debajo de la neutralidad alcanzando una etapa ácida; al transcurrir los 16 días de digestión se observa que ensayos como 14CON1 y 14CON3 alcanzan un pH cercano a la neutralidad, de 6,5, mientras que los demás ensayos presentan un aumento de pH durante los primeros 5 días hasta que finalmente decae y permanece en la etapa ácida, sin reportar ninguna producción de biogás.

---

<sup>67</sup> ORTEGA VALBUENA, Op. Cit., p. 28-29.

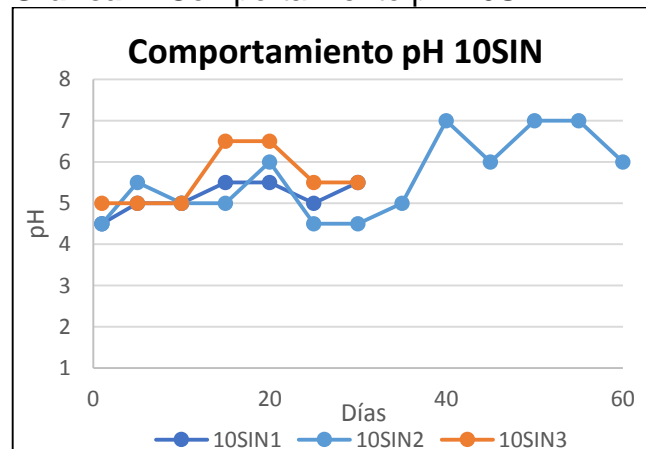
**3.4.1.2 Montaje experimental 2.** Este montaje fue desarrollado durante 30 días. A continuación se muestra el comportamiento para todos los ensayos. Para 4 de los ensayos con mayor producción de gas se aumentó el tiempo de retención y se observó su comportamiento por 60 días. Los resultados completos para todos los ensayos se muestran en el ANEXO M. En la gráfica 1 se muestran los resultados para el ensayo 7SIN y sus réplicas.

**Gráfica 1. Comportamiento pH 7SIN.**



El ensayo 7SIN y sus réplicas inician en un pH ácido de 5,5 y 6,0, posteriormente se observa un aumento en el pH el cual favorece la producción de biogás<sup>68</sup> y en el que se trata de mantener un equilibrio en el sistema. Para la réplica 7SIN2, la cual se mantiene por 60 días, se observa un comportamiento inestable de aumento y disminución del pH finalizando en una etapa ácida con pH de 4,0, sin ningún aumento en la producción de biogás.

**Gráfica 2. Comportamiento pH 10SIN.**

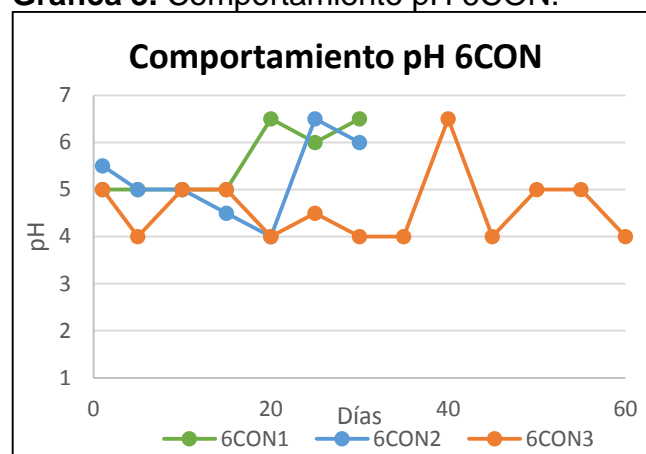


<sup>68</sup> ORTEGA VALBUENA, Op. Cit., p. 28-29.

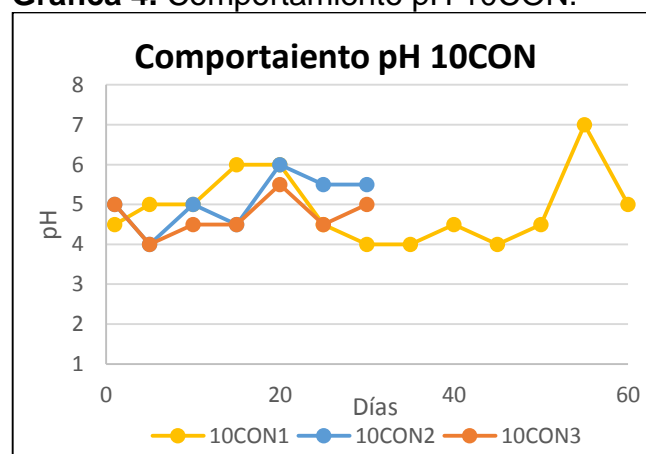
Para la gráfica 2, se observa un comportamiento similar para los 3 ensayos, pues el pH inicia ácido en 4,5 y 5,0 y posteriormente presenta un aumento hasta 6,5 durante los primeros 20 días y finalmente una disminución del pH hasta finalizar la digestión en el día 30. Se observa una diferencia significativa en el ensayo 10SIN2 el cual tuvo un tiempo de retención de 60 días, ya que a partir de los 30 días se da un aumento en el pH hasta alcanzar 6,0 y 7,0 y permanece cercano a la neutralidad hasta finalizar el tiempo de retención sin evidenciar ninguna producción de biogás.

Por otro lado en las gráficas 3 y 4 se observa el comportamiento del pH para los ensayos con inóculo.

**Gráfica 3. Comportamiento pH 6CON.**



**Gráfica 4. Comportamiento pH 10CON.**



Para los ensayos con inóculo, se observa que éstos iniciaron en una etapa ácida con un pH entre 4,5 y 5,5. En cuanto al comportamiento del pH durante el tiempo de retención, se presentan variaciones para las 2 condiciones de operación, pues para los ensayos 6CON1 y 6CON2 se alcanza la neutralidad después de 20 días de

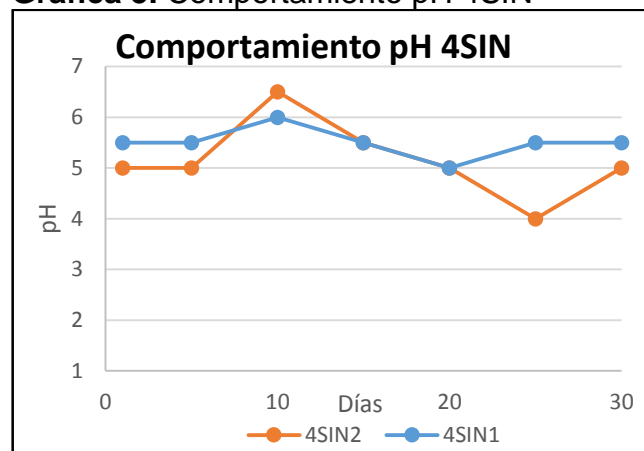
retención mientras que para 6CON3, el cual produjo mayor cantidad de gas, se observa que permanece en la etapa ácida hasta el día 30, durante los siguientes 20 días aumenta el pH y alcanza la neutralidad pero finalmente decae y finaliza en 5,0 tras 60 días de digestión, sin evidenciar producción de biogás en los últimos 30 días.

Para los ensayos 10CON se observa un comportamiento similar para los 3 ensayos mostrando un aumento en el pH hasta el día 20 y finalmente una disminución del mismo hasta finalizar la digestión anaerobia. Para el ensayo con mayor producción de gas, 10CON1, se observa que el sistema permanece ácido hasta los últimos días de retención en donde aumenta el pH hasta 7 y finalmente tras 60 días disminuye nuevamente a 5,0.

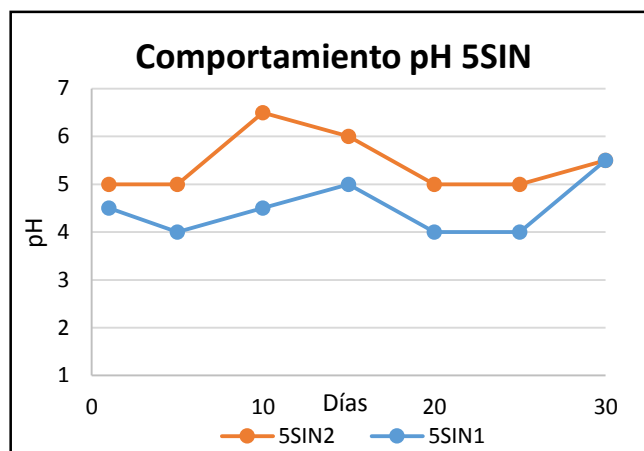
En los ensayos que tuvieron un tiempo de retención de 60 días, se detectó un cese en la producción de biogás debido a que pudo ocurrir que se presentó un déficit de nutrientes para que los microorganismos continuaran su reproducción causando así su muerte al no sobrevivir a las condiciones del medio.

**3.4.1.3 Montaje experimental 3.** En las gráficas 5 a 8 se muestra el comportamiento del pH para todos los biodigestores a escala laboratorio.

**Gráfica 5. Comportamiento pH 4SIN**



**Gráfica 6. Comportamiento pH 5SIN**



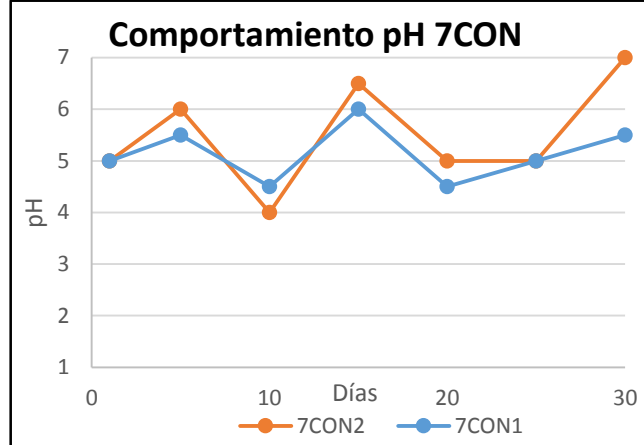
Las gráficas 5 y 6 muestran el comportamiento de pH sin adición de inóculo y con una diferencia de 1% en su contenido de sólidos totales. No hay una gran diferencia en el comportamiento de estos ensayos, puesto que se comienza en un pH ácido, aumenta su alcalinidad y disminuye nuevamente para finalmente mantenerse ácido. Esto puede deberse a la falta de un agente que proporcione una neutralidad en el sistema, como lo haría un inóculo, ya que los residuos de frutas y verduras tienen un pH ácido característico.

Se debe considerar la alta producción de AGV debido a una mayor producción de bacterias acidogénicas que inhibe el crecimiento de bacterias metanógenas que son las responsables de alcalinizar el sistema, razón por la cual no se llega a mantener constante la neutralidad<sup>69</sup>.

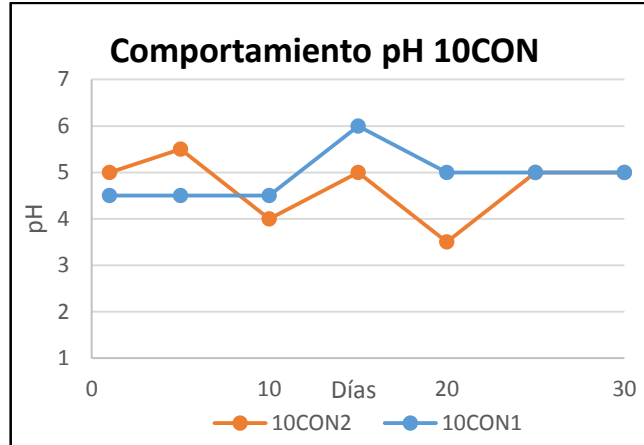
---

<sup>69</sup> CAMACHO, Ricardo, VILLADA, Héctor S. y HOYOS, José I. Evaluación del Estiércol de Vaca como Inóculo en la Digestión Anaerobia Termófila de Residuos Sólidos Urbanos, Universidad del Cauca, 2017, p, 33.

**Gráfica 7. Comportamiento pH 7CON**



**Gráfica 8. Comportamiento pH 10CON**



La gráfica 7 y gráfica 8, relacionan la adición de inóculo con una diferencia en los sólidos totales. El comportamiento ideal del pH debe disminuir en su fase acidogénica y aumentar en su fase acetogénica y metanogénica. Debido a las características ácidas del sustrato y una descomposición rápida de este, se da una producción excesiva de ácidos volátiles grasos, en donde, a pesar de tener inóculo el cual debería aumentar la capacidad Buffer del sistema, no es posible mantener un balance en el pH. El sistema intenta aumentar su alcalinidad, pero la producción de ácidos volátiles es mayor, por lo que decrece continuamente y no es posible llevarlo a un valor cercano a 7, en donde se da una producción de metano acorde con los sólidos volátiles que se encuentran en el sistema. Debe también considerarse que a pesar de la diferencia de sólidos totales, el comportamiento del pH es similar.

Finalmente se concluye que el comportamiento del pH para todos los ensayos de cada montaje experimental presentó variaciones que no evidenciaron una

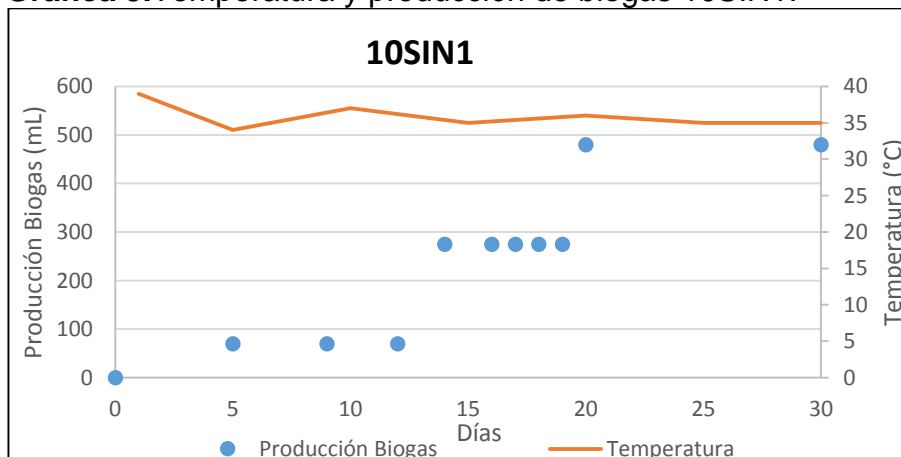
influencia determinante en el proceso de digestión anaerobia. Pues el pH se mantuvo entre 4 y 7 para todos los ensayos durante el tiempo de retención y no se relacionó este comportamiento con la producción de biogás, sin embargo algunos autores como B. Deepanraj, V. Sivasubramanian y S. Jayaraj, mencionan que es importante controlar el pH durante el proceso para garantizar que los microorganismos sobrevivan en el medio de cultivo y presenten resultados más satisfactorios en cuanto a cantidad y calidad del biogás<sup>70</sup>.

**3.4.2 Comportamiento de producción de biogás y temperatura.** La temperatura mesofílica de 35°C se eligió como una condición fija para todos los ensayos, se presentaron variaciones de hasta  $\pm 5^\circ\text{C}$ . El registro de temperatura completo se encuentra en el ANEXO N. Por otro lado, la producción de biogás se registró diariamente por medio del volumen de agua desplazado aplicando el método volumétrico y a continuación se muestran los resultados obtenidos de ambos parámetros para los 3 montajes experimentales.

**3.4.2.1 Montaje experimental 1.** Para el montaje experimental 1, se tiene un comportamiento similar en cada uno de los ensayos con adición y sin adición de inóculo. Para los experimentos con adición de inóculo se comienza con una temperatura de 40°C, disminuye a 32°C y se eleva a una temperatura de 36°C para mantenerse constante y para los experimentos sin inóculos se comienza con una temperatura de 34°C, aumenta a 38°C y disminuye para mantenerse constante a 34°C. Debido a que no hubo producción de biogás, no se conoce la influencia del cambio de la temperatura.

**3.4.2.2 Montaje experimental 2.** En las gráficas 9 a 18 se muestra la producción de biogás registrada diariamente para los ensayos y el monitoreo de la temperatura para cada uno.

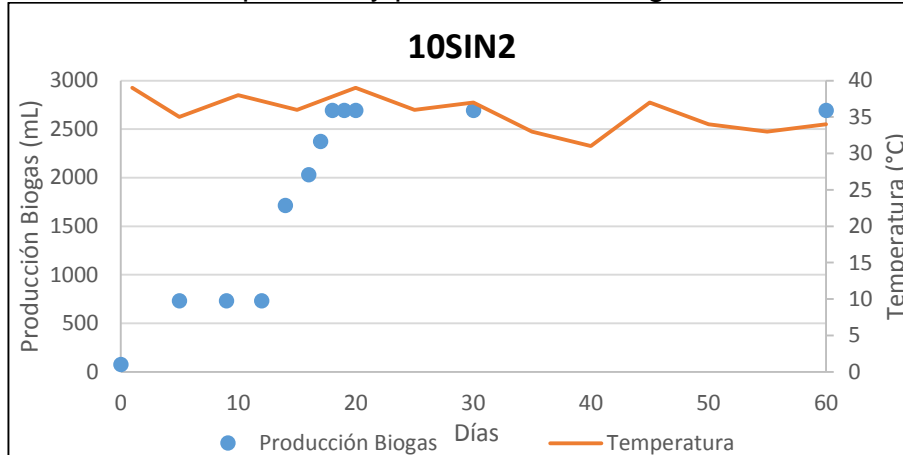
**Gráfica 9.** Temperatura y producción de biogás 10SIN1.



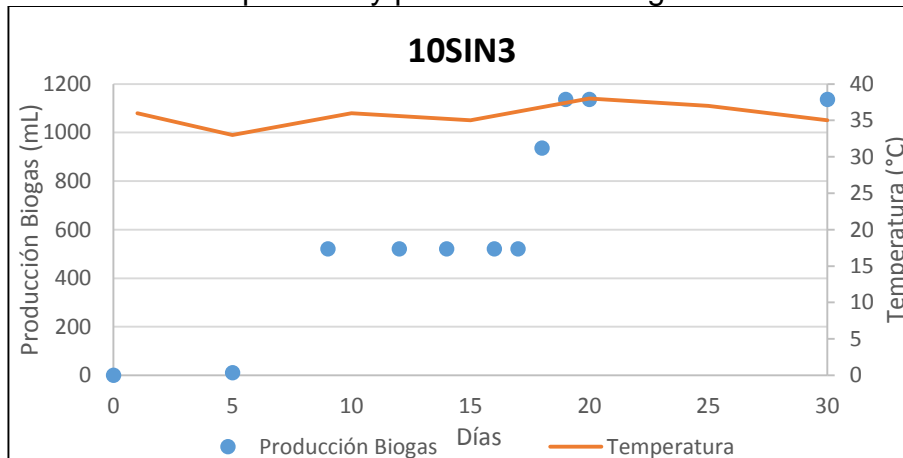
<sup>70</sup> DEEPNRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Op. Cit., p. 100-104.



**Gráfica 10.** Temperatura y producción de biogás 10SIN2.



**Gráfica 11.** Temperatura y producción de biogás 10SIN3.

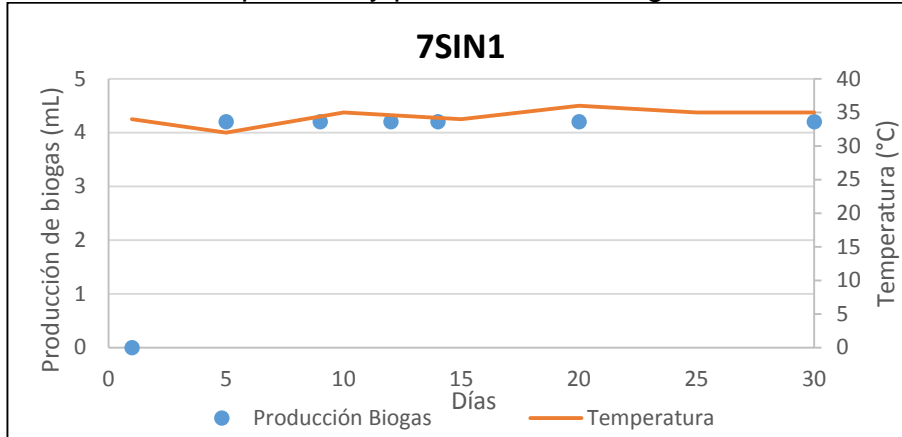


En la gráficas 9 a 11, se comparan las 3 réplicas de 10SIN, en donde se observa que llegando al día 20, los 3 ensayos, presentan un aumento en la producción de biogás significativo, entre 200mL y 1000mL, a una temperatura aproximada de 35°C, seguido de un cese en la producción de biogás y manteniéndose de esta forma hasta finalizar el tiempo de la digestión. Allí se evidencia que para los primeros 10 días se desarrolló de la etapa acidogénica, seguido de la acetogénica y metanogénica entre los 10 y 20 días, dando finalización a la digestión anaerobia. Resultados similares se obtuvieron por autores como López Martínez<sup>71</sup> en donde los ensayos sin inóculo presentaron la mayor producción de biogás desde el inicio de la digestión hasta los días 10 y 15, y durante el tiempo de retención restante la producción de biogás descendió y permaneció constante.

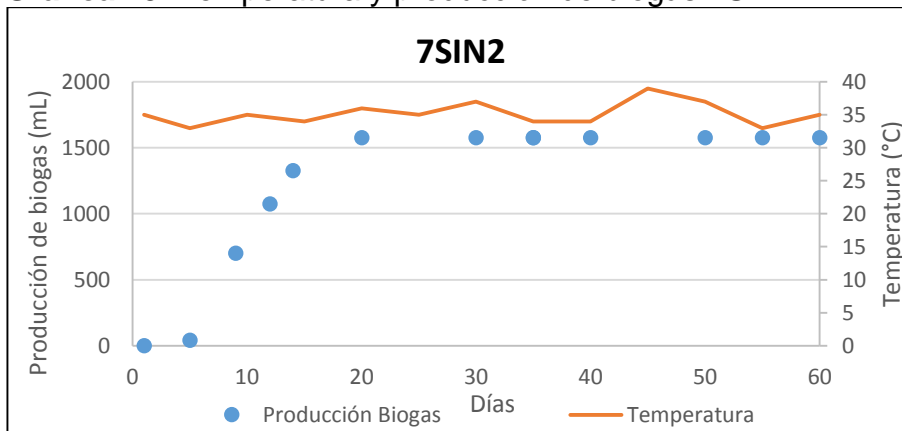
<sup>71</sup> LÓPEZ MÁRTINEZ, Germán A. Op. cit., p. 34.

En las gráficas 12, 13 y 14, se muestra el comportamiento para los ensayos 7SIN1, 7SIN2 y 7SIN3.

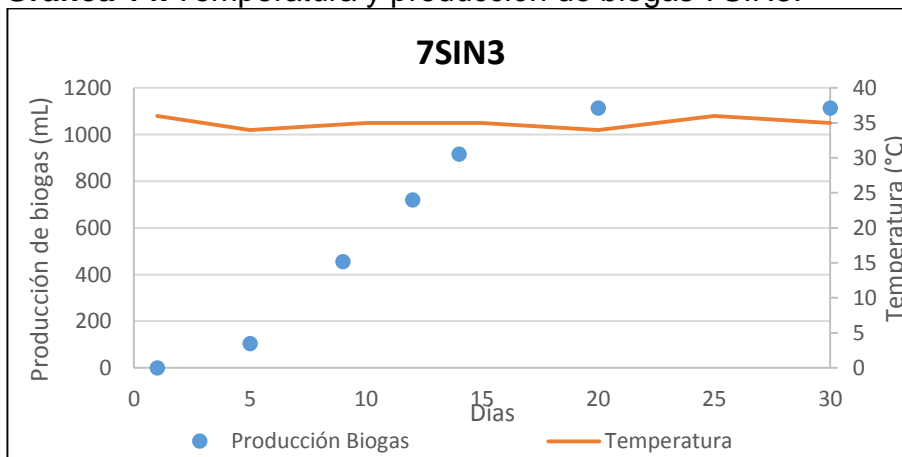
**Gráfica 12.** Temperatura y producción de biogás 7SIN1.



**Gráfica 13.** Temperatura y producción de biogás 7SIN2.



**Gráfica 14.** Temperatura y producción de biogás 7SIN3.

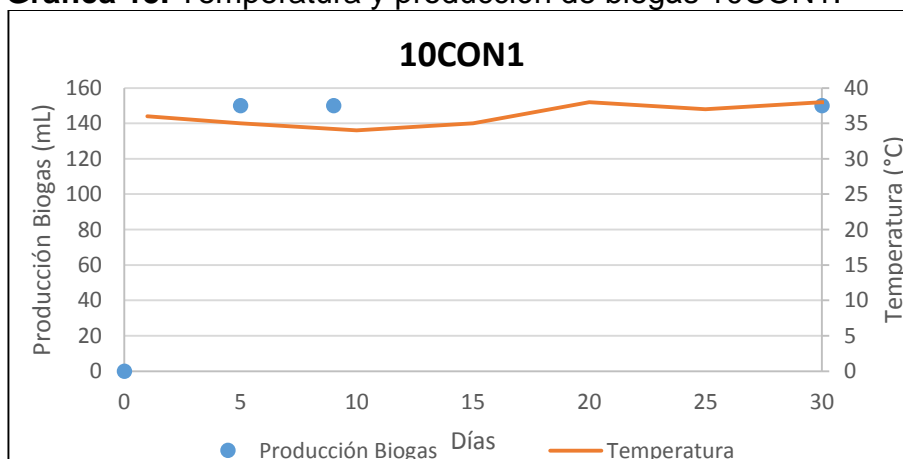


Como se observa en las gráficas anteriores, la producción de biogás para los ensayos 7SIN2 y 7SIN3 fue similar, pues la temperatura se mantuvo en un rango mesófilo y entre los días 10 y 20 se observa el alcance de la producción máxima de biogás, de igual forma que para los ensayos 10SIN. Sin embargo, para el ensayo 7SIN1 no se detectó producción de biogás, pues 4mL fue la producción alcanzada, en donde se demuestra que se inhibió la digestión anaerobia y no se llevó a cabo el proceso. Para este caso en particular, se observa en la gráfica 1, que el pH cumplió con el comportamiento esperado al igual que la temperatura, por lo tanto se concluye que pudo existir fallas en el montaje experimental del ensayo 7SIN1, como una posible fuga de gas en el biodigestor o en la botella invertida (que constituyó el método volumétrico) y una posible inhibición de la digestión anaerobia por la entrada de oxígeno al sistema al monitorear la temperatura y el pH.

Para los ensayos sin inóculo, se obtiene que aquellos con un contenido de sólidos totales de 10% produjeron 1616mL de biogás más que aquellos con 7%ST, lo que equivale a un aumento del 37% en la producción. Esto permite concluir que a mayor concentración de sólidos totales en el reactor se obtendrá una mayor producción de biogás. Afirmación que se ratifica con lo planteado por autores como D. Thamilselvan, M. Kannan y P. Lawrence<sup>72</sup>, que concluyen que al evaluar una concentración de ST de 5% y 10%, se obtuvo mayor producción de gas con los ensayos de mayor contenido de ST.

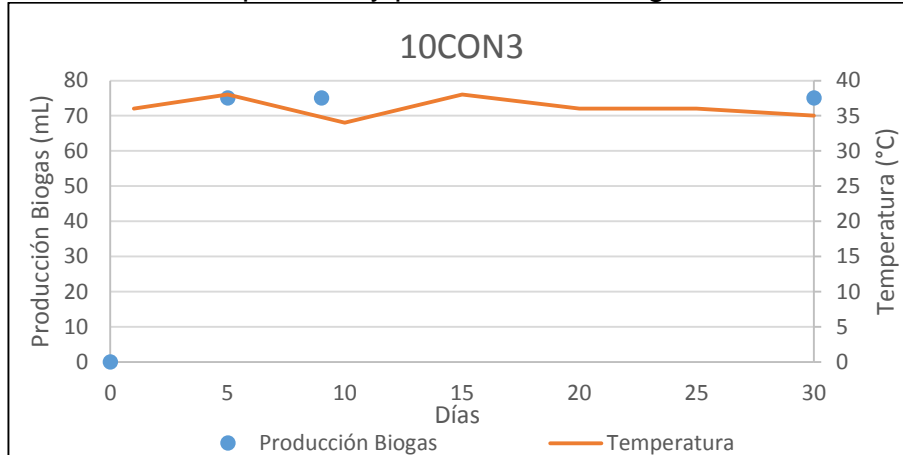
En las gráficas 15 y 16 se muestra lo obtenido para los ensayos 10CON1 y 10CON3 y en las gráficas 17 y 18 se muestra lo obtenido para los ensayos 6CON2 Y 6CON3. Los ensayos 10CON2 y 6CON1 no reportaron producción de biogás durante los 30 días de digestión anaerobia.

**Gráfica 15.** Temperatura y producción de biogás 10CON1.



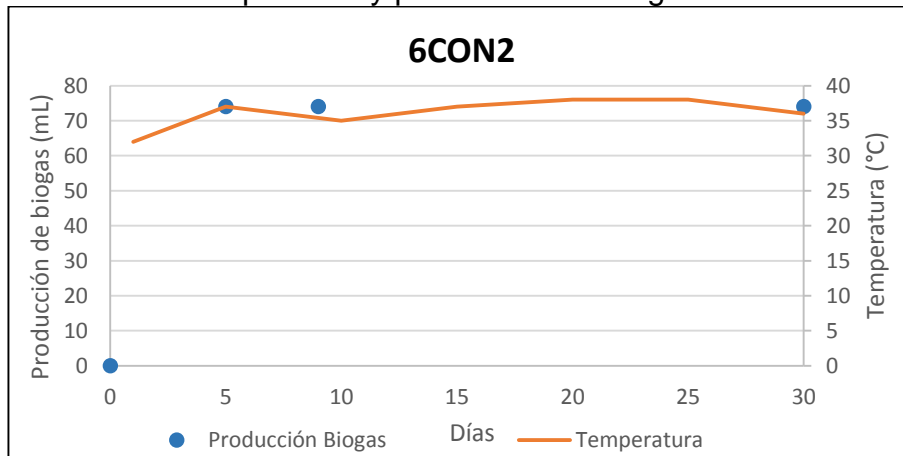
<sup>72</sup> THAMILSELVAN, D.; KANNAN, M. y LAWRENCE, P. Experimental And Theoretical Study On The Effect Of Solid Concentration On Biogas Production From Food Waste. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ENGINEERING TECHNOLOGY. vol. 7, no. 2, p. 694-696

**Gráfica 16.** Temperatura y producción de biogás 10CON3.

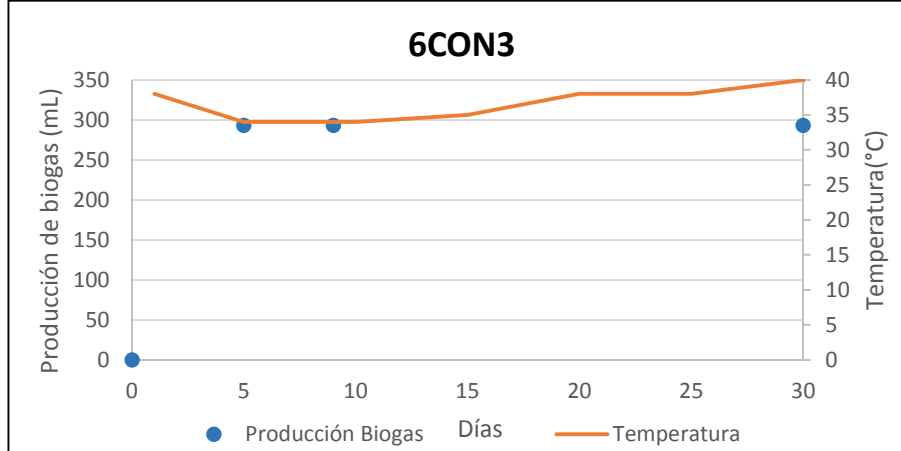


Los ensayos 10CON1 y 10CON3 no reflejan una elevada producción de biogás comparada con los ensayos sin inóculo que si la presentaron, adicional, no se determinan las etapas de la biodigestión. Igualmente sucedió para el ensayo 10CON2 que no registró producción de biogás. Esto pudo deberse a una inhibición por la presencia de antibióticos en el estiércol, pues se desconoce si el ganado fue medicado previamente a su sacrificio en el frigorífico. La presencia de antibióticos impide el desarrollo de consorcios bacterianos que desarrollen satisfactoriamente las etapas de la digestión anaerobia.

**Gráfica 17.** Temperatura y producción de biogás 6CON2.



**Gráfica 18.** Temperatura y producción de biogás 6CON3.



Para un contenido de sólidos totales de 6% al igual que para los ensayos con sólidos totales de 10% con presencia de inóculo, se observa una producción muy baja de biogás, que oscila entre los 80mL y 300mL, al compararlo con la producción de los ensayos sin inóculo que fue de 1000mL a 2800mL. Esto, como anteriormente se mencionó, pudo deberse a una inhibición por antibiótico que contenía el estiércol bovino, ya que se evidencia que el contenido de sólidos totales no afectó la producción de biogás para los ensayos con inóculo y la temperatura se mantuvo en un rango mesófilo que tampoco influyó en estos ensayos.

Autores como F. Raposo, R. Borja, M.A Martín, A. Martín, M.A. de la Rubia y B. Rincón, reportan que al adicionar inóculo a los biodigestores, en relaciones inóculo sustrato de 3:1 hasta 4:5<sup>73</sup>, se estimula favorablemente la producción de biogás por lo tanto, con los resultados obtenidos para los ensayos 6CON y 10CON se confirma que el inóculo pudo estar contaminado con algún agente inhibitorio de microorganismos anaerobios ya que ocurrió lo contrario a lo esperado, no se aumentó la producción de biogás comparado con los ensayos sin inóculo.

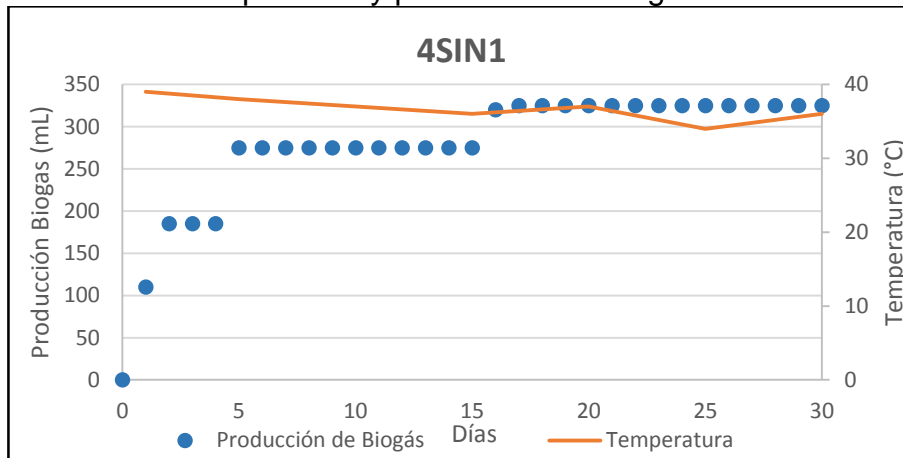
**3.4.2.3 Montaje experimental 3.** A continuación se observa que la producción de biogás durante los 30 días de retención, mostró un comportamiento escalonado para todos los ensayos, esto puede deberse a que al realizar el monitoreo de pH y temperatura cada 5 días, se destapó el sistema causando la disminución de la presión en el mismo al retirar el tapón de cada biodigestor. Razón por la cual el sistema debe equilibrar la presión nuevamente para lograr el desplazamiento de agua en el método volumétrico. Ocasionando así una cantidad de biogás retenido durante un tiempo en el digestor hasta alcanzar una presión suficiente para

<sup>73</sup> RAPOSO, F., et al. Influence of inoculum–substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. En: CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. vol. 149, p. 70-77.

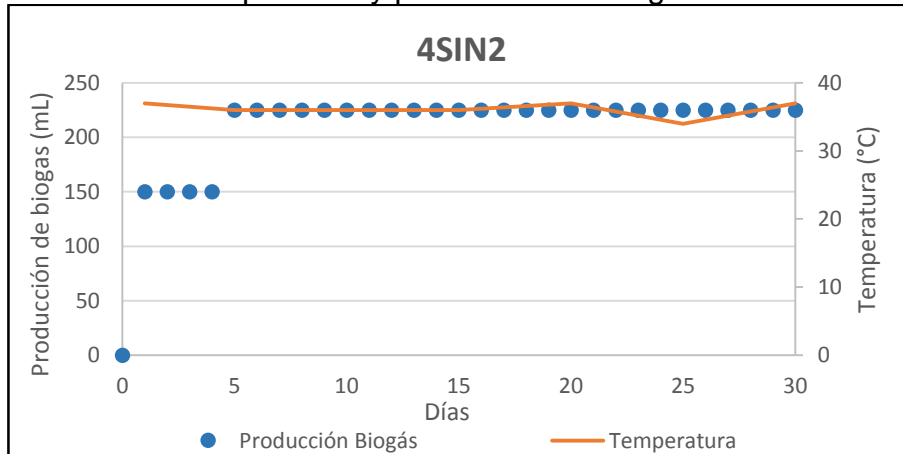
desplazar el agua destilada. Este se presentó durante los días de medición de temperatura y pH y posiblemente afectó la cuantificación de la producción real de biogás para todos los ensayos.

Dando paso al análisis de los resultados obtenidos, se comienza con los ensayos 4SIN1 y 4SIN2 que se muestran en las gráficas 19 y 20.

**Gráfica 19.** Temperatura y producción de biogás 4SIN1.



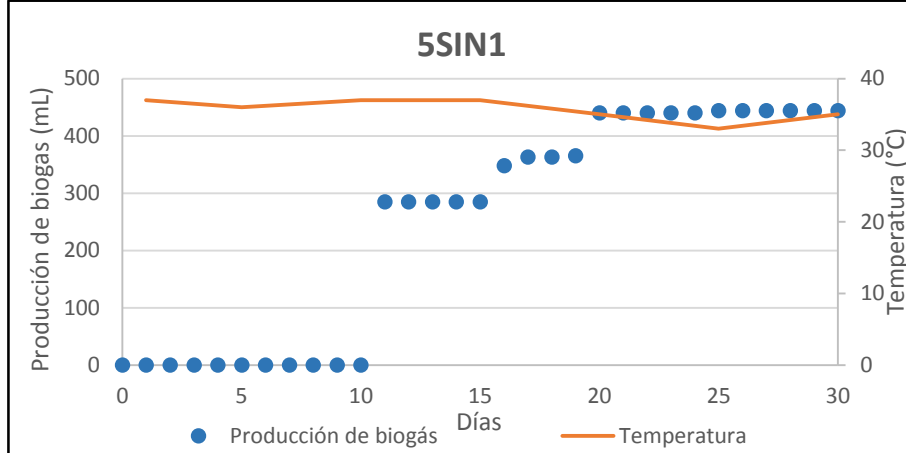
**Gráfica 20.** Temperatura y producción de biogás 4SIN2.



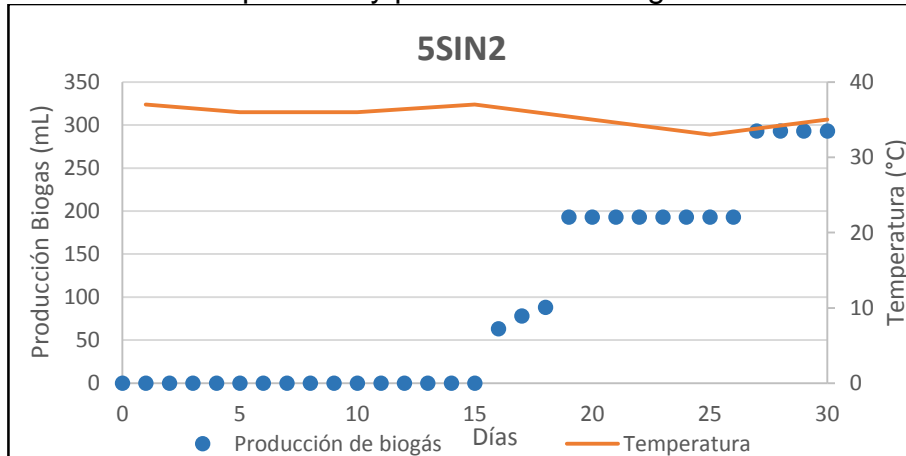
En las réplicas de 4% de contenido de sólidos totales se observa un comportamiento que refleja las etapas de la digestión anaerobia con una producción de biogás que para 4SIN2 finaliza a partir del décimo día, mientras que para 4SIN1 finaliza después del día 20; ambos ensayos manteniendo una temperatura cercana a 35°C. Evidenciando así que la temperatura no fue causa de la diferencia en la producción de biogás para estos ensayos.

En las gráficas 21 y 22 se muestran los resultados para el ensayo 5SIN y su réplica.

**Gráfica 21.** Temperatura y producción de biogás 5SIN1.



**Gráfica 22.** Temperatura y producción de biogás 5SIN2.



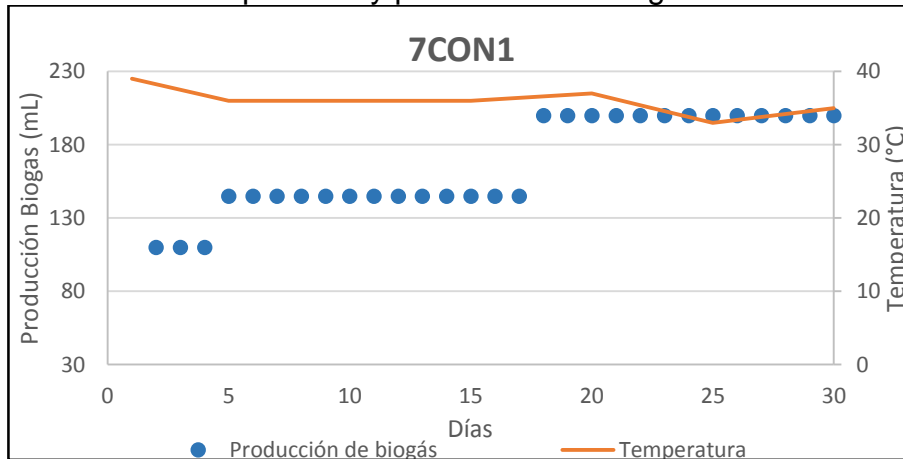
Para el ensayo 5SIN se observa que se presentó una fase de latencia de 10 a 15 días para iniciar la producción de biogás. También se evidencia el comportamiento escalonado como en los ensayos anteriores, encontrando que para el ensayo original y su réplica, la temperatura permanece cercana a 35°C. En comparación con la gráfica 19 y 20, de los ensayos 4SIN, se observa que no hay una variación significativa en la producción de biogás aumentando en 1% el contenido de sólidos totales.

Sin embargo al comparar la producción de biogás obtenida para los ensayos sin inóculo del montaje experimental 2 (gráficas 9 a 14) se concluye que el contenido de sólidos influyó en el proceso, pues para contenidos de sólidos totales de 7% y 10% se obtuvo entre 1100mL y 2800mL de biogás mientras que para un contenido de 4% y 5% no se superó los 450mL, es decir, teniendo en cuenta la producción de biogás acumulada, se disminuyó la producción de biogás en aproximadamente un

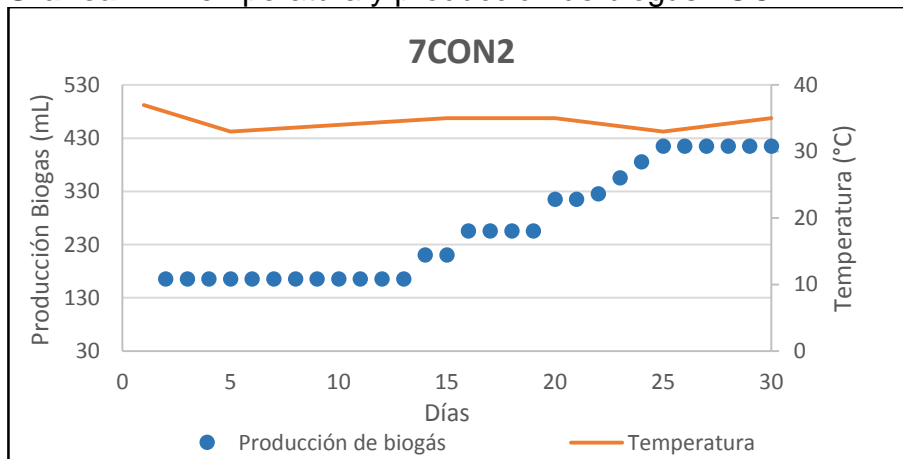
20%. Reafirmando nuevamente que a mayor contenido de sólidos totales se obtendrá una mayor producción de biogás<sup>74</sup>, sin sobrepasar el límite para un reactor tipo batch que corresponde a 15% ST<sup>75</sup>.

En las gráficas 23 y 24 se muestran los resultados para los ensayos 7CON1 y 7CON2.

**Gráfica 23.** Temperatura y producción de biogás 7CON1.



**Gráfica 24.** Temperatura y producción de biogás 7CON2.



Para los ensayos con adición de inóculo y 7% de sólidos totales, las etapas de la digestión son más notorias, evidenciadas en el comportamiento que tiene la producción de biogás con una tendencia escalonada para ambos ensayos. La

<sup>74</sup> THAMILSELVAN; KANNAN y LAWRENCE. Op. Cit., p.695.

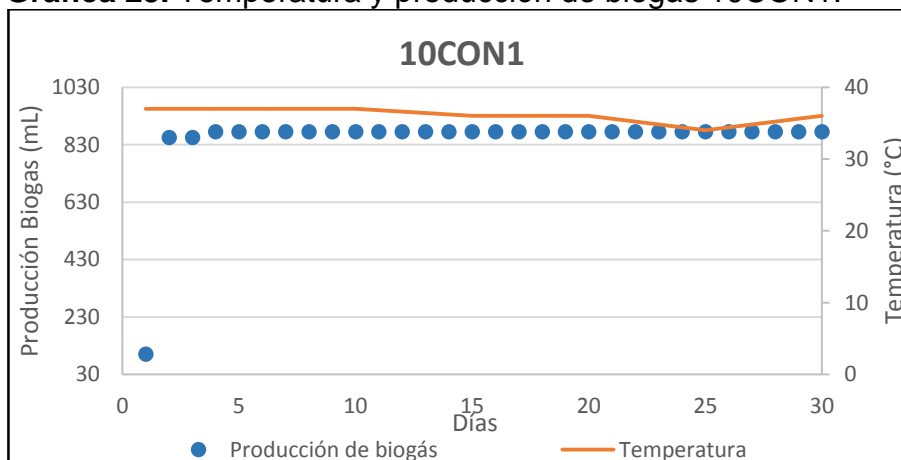
<sup>75</sup> MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Op. Cit., p.36-37



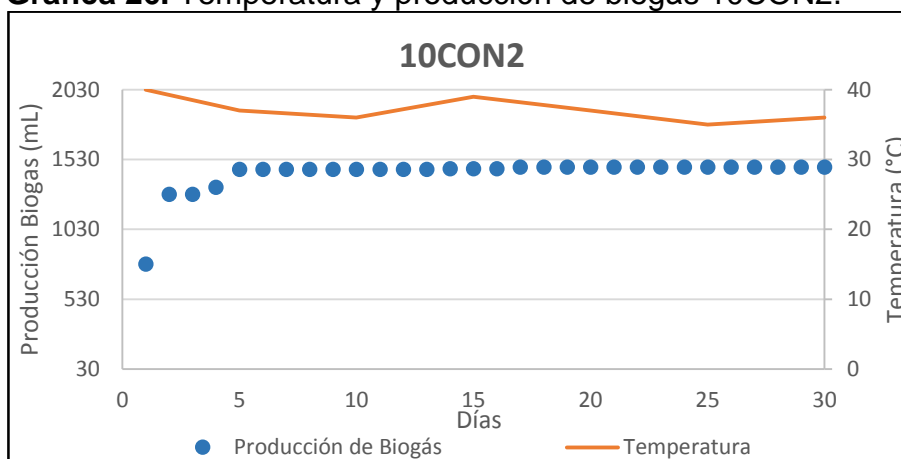
temperatura oscila en un rango entre 33°C y 37°C y la producción cesa a partir de los 20 días para 7CON1 y después de los 25 días para 7CON2.

En las gráficas 25 y 26 se muestran los resultados para los ensayos con inóculo y 10% de sólidos totales.

**Gráfica 25.** Temperatura y producción de biogás 10CON1.



**Gráfica 26.** Temperatura y producción de biogás 10CON2.



En las réplicas de 10% de contenido de sólidos totales con adición de inóculo, se observa un comportamiento que refleja las etapas de la digestión anaerobia con una producción de biogás significativa hasta el décimo día. Después la producción de biogás se detiene hasta finalizar el tiempo de retención. En comparación con el gráfico 14, en donde se muestra el comportamiento para un contenido de sólidos totales de 7%, se analiza que la variación de 3% en los sólidos totales con adición de inóculo, aproximadamente duplica la producción de biogás, por lo que la variación en este porcentaje mejora el volumen de producción y deberá tenerse en cuenta al momento de llevar a cabo una digestión a una escala piloto o industrial.

Cabe señalar, que la variación entre las réplicas puede deberse a que cada bioreactor contuvo proporciones distintas de cada elemento característico que compone el sustrato (frutas y verduras). El pretratamiento realizado para disminuir el tamaño de partícula pudo afectar el proceso ya que no se comprobó que los R.O tuvieran el mismo tamaño de partícula, lo cual pudo afectar el desarrollo de los microorganismos dentro del sistema.

Para determinar si el biogás obtenido por los ensayos trabajos presenta la composición común reportada en la bibliografía, se realiza un análisis de metano por cromatografía de gases.

**3.4.3 Cromatografía de gases.** La cuantificación de la cantidad de gas producido es un parámetro importante para predecir la producción de gas esperado en un reactor de mayor tamaño, sin embargo la calidad de éste es el que determina qué tan factible es operar el proceso a una escala mayor, por esta razón es necesario realizar la cromatografía de gases e identificar cuál ensayo obtuvo mayor contenido de metano.

El análisis de metano por cromatografía de gases se realizó para las muestras de biogás obtenidas del montaje experimental 3. Se analizaron 4 muestras las cuales corresponden a la mezcla de cada condición de operación evaluada y su réplica, con el fin de reducir el número de muestras. La mezcla del biogás obtenido para cada ensayo original y su réplica se realizó por medio de la conexión de las bolsas de recolectoras de gas a un macrogoteo que permitió el flujo de gas de una bolsa a otra, mezclándolo completamente. Posteriormente fueron etiquetadas y enviadas a análisis de metano por cromatografía de gases por la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Colombia en la ciudad de Bogotá. La fecha de entrega de muestras fue el día 5 de Junio de 2017 y los resultados fueron obtenidos el 14 de junio de 2017.

El análisis de metano se realizó con un cromatógrafo Hp 5890 con un detector de conductividad térmica (TCD) a una temperatura de 150°C, un inyector a una temperatura de 100°C y columna con una malla molecular 13x. El tamaño de muestra fue de 0,1mL.

Los resultados para cada muestra se muestran en la tabla 9. Los resultados completos obtenidos de la Universidad Nacional se encuentran en el ANEXO O.

**Tabla 9.** Cromatografía de gases.

<b>ENSAYO</b>	<b>CONTENIDO DE METANO (%v/v)</b>
4SIN	No detectado
7CON	3,8
5SIN	No detectado
10CON	0,5

**Fuente:** Adaptado de resultados de análisis de metano por cromatografía de gases. (ANEXO O).

Como se observa en los resultados de la cromatografía de gases, la cantidad de metano detectada fue muy baja, de 0,5 y 3,8% para los ensayos que tuvieron inóculo y para los ensayos sin inóculo no se detectó metano. Esto se debe principalmente a la limitación de sólidos volátiles y la presumible ausencia de microorganismos metanogénicos en los ensayos sin inóculo. Por otro lado, para los ensayos con inóculo, pudo existir una mayor producción de dióxido de carbono en las fases de acidogénesis y acetogénesis, disminuyendo la producción de metano.

Se determina que las muestras de biogás reportaron una composición baja en metano comparada con la composición típica del biogás que presenta un contenido de metano de 55-70%<sup>76</sup>.

Adicionalmente se debe tener en cuenta que al monitorear pH y temperatura, se retiraba el tapón del biodigestor y esto pudo causar una salida de biogás y a la vez una entrada de aire al sistema, en especial de oxígeno, causando la pérdida del medio anaerobio en éste e inhibiendo la digestión anaerobia.

A partir de los resultados obtenidos se puede reafirmar que la producción de biogás y la calidad de éste no fue la esperada por múltiples razones que afectaron el desarrollo experimental. Como se ha mencionado anteriormente, se pudo presentar la inhibición de microorganismos metanogénicos por cambios en el pH y la presencia de oxígeno dentro del sistema, también existió fuga del biogás y la entrada de aire al sistema, al monitorear pH y temperatura, lo que pudo afectar la cuantificación de la producción de biogás. Se debe tener en cuenta que el montaje experimental no contó con un sistema de agitación constante lo cual pudo impedir el crecimiento de microorganismos para todos los ensayos y en especial, para aquellos con inóculo ocasionó la formación de espuma en la superficie del material cargado al biodigestor afectando igualmente la producción de biogás, pues la

<sup>76</sup> DEUBLEIN, Dieter and STEINHAUSER, Angelika. Biogas from waste and renewable resources. Wiley –VCH, 2008. p. 50.

espuma conlleva a la concentración en exceso de ácidos grasos volátiles<sup>77</sup>, causando la inhibición de los microorganismos al no poder superar la etapa ácida de la digestión.

Finalmente, para continuar con el desarrollo del proyecto, se planteó la cinética de la digestión anaerobia basada en la producción de metano durante el proceso, esto se llevó a cabo utilizando datos reportados en la literatura como artículos y tesis que trabajaron a condiciones de operación similares. Posteriormente se realizó el dimensionamiento de un biodigestor con la capacidad de procesar la cantidad de residuos orgánicos que genera la PDM Siete de Agosto.

---

<sup>77</sup> LORENZO ACOSTA, Yaniris y OBAYA ABREU, M. Cristina. La Digestión anaerobia. Aspectos teóricos Parte 1. En: ICIDCA. SOBRE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR. vol. 34, no. 1, p. 40.

## 4. DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

El dimensionamiento del biodigestor se plantea a partir de resultados reportados en la bibliografía debido a que los resultados experimentales no fueron satisfactorios.

Partiendo de una revisión bibliográfica de artículos y tesis que emplearon condiciones de operación similares a las trabajadas experimentalmente para este proyecto, se elige un modelo cinético que permite relacionar los resultados teóricos reportados con las ecuaciones de diseño para reactores a escala industrial.

### 4.1 TIPO DE BIODIGESTOR

Se elige dimensionar un reactor tipo CSTR ya que es el más común utilizado en la industria y del cual se encuentra más información en la literatura en cuanto a sus condiciones de operación, modelamiento de la cinética bioquímica y resultados del proceso de digestión anaerobia.

Para la construcción del biodigestor en cuanto al material se refiere, se elige polietileno de alta densidad (HDPE) principalmente por sus bajos costos, su resistencia a altas temperaturas y su resistencia a sustancias altamente corrosivas y densas<sup>78</sup>.

### 4.2 CINÉTICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

El modelo cinético más común que representa el proceso de la digestión anaerobia corresponde a la cinética de Monod, la cual involucra la degradación de la materia orgánica, la actividad microbiana, la composición del biogás y la producción de metano<sup>79</sup>. Sin embargo, el alcance del proyecto no involucró el análisis de la carga microbiana dentro de los biodigestores ni el consumo de sustrato durante el proceso, por esta razón se busca un modelo cinético en términos de la producción de biogás y el contenido de metano de éste para el dimensionamiento del biodigestor, pues estos parámetros fueron medidos para los ensayos realizados.

Para el dimensionamiento del biodigestor se utiliza como punto de partida el modelo cinético empírico de Gompertz y se tomará como referencia la investigación planteada por los autores B. Deepanraj, V. Sivasubramanian y S. Jayaraj<sup>80</sup>. Pues

---

<sup>78</sup>Rotoplas. Ficha técnica Tanques de almacenamiento. [En Línea] [http://archivos.distribuidornacional.com/Catalogos2014V2/TANQUES/Ficha\\_tecnica\\_Tanques\\_para\\_Agua\\_y\\_Quimico.pdf](http://archivos.distribuidornacional.com/Catalogos2014V2/TANQUES/Ficha_tecnica_Tanques_para_Agua_y_Quimico.pdf). Citado el día 30 de junio de 2017.

<sup>79</sup>FEDAILAINE, M., et al. Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production. En: ELSEVIER. vol. 52, p. 730-737.

<sup>80</sup>DEEPNRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. vol. 121, p. 100-104.

en su investigación se desarrolla un estudio cinético en donde se evalúa el efecto de la temperatura en la producción de biogás utilizando un reactor tipo batch a escala laboratorio para residuos de comida durante un tiempo de retención de 30 días. Se seleccionó este artículo como base para el dimensionamiento del biodigestor ya que se encuentra en términos de la producción de biogás durante el proceso, y además por las similitudes en el desarrollo del diseño experimental a escala laboratorio con las planteadas para este proyecto, pues se utilizó un contenido de ST de 7,5%, un volumen de reactor de 2L, temperaturas mesofílicas, tiempo de retención de 30 días y adicionalmente, se plantea el modelamiento de la cinética de la digestión anaerobia basándose en la producción de biogás obtenida.

En la tabla 10 se muestran las condiciones de operación trabajadas en el artículo y en este proyecto.

**Tabla 10.** Condiciones de operación teóricas y experimentales.

<b>Condición de operación</b>	<b>Artículo por DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S.</b>	<b>Proyecto</b>
Tipo de residuos	Residuos de comida	Residuos de plaza
Temperatura (°C)	30, 40, 50 y 60	35
pH	Controlado a 7.0	Sin control
Tiempo de retención (días)	30	30
Volumen de carga (mL)	1600	1400
Volumen del biodigestor (mL)	2000	2000
Tipo de biodigestor	Batch	Semibatch

El modelo de Gompertz, se emplea para modelar el comportamiento de la producción de biogás en función de la tasa máxima de producción de biogás en mL ( $P_{m\acute{a}x}$ ), el potencial de rendimiento del biogás en mL/día ( $R_{m\acute{a}x}$ ) y la duración de la fase latente en días ( $\lambda$ ). Partiendo de datos experimentales conocidos como la producción acumulada de biogás en mL ( $V_{Biogas}$ ) y el tiempo de retención en días ( $t$ ), se sigue la ecuación <sup>81</sup>:

**Ecuación 1.** Modelo cinético de Gompertz.

$$V_{biogas} = P_{m\acute{a}x} \exp \left( - \exp \left( \frac{R_{m\acute{a}x} \exp(1)}{P_{m\acute{a}x}} (\lambda + t) + 1 \right) \right)$$

<sup>81</sup> *Ibíd.*, p. 101.

Teniendo en cuenta que con los resultados experimentales no se puede hacer el modelamiento cinético para este proyecto, se utilizan los resultados reportados por B. Deepanraj, V. Sivasubramanian y S. Jayaraj<sup>82</sup>, los cuales fueron interpolados a una temperatura de 35°C y son mostrados en la tabla 11. En el ANEXO P se muestran los resultados completos reportados.

**Tabla 11.** Parámetros cinéticos a 35°C.

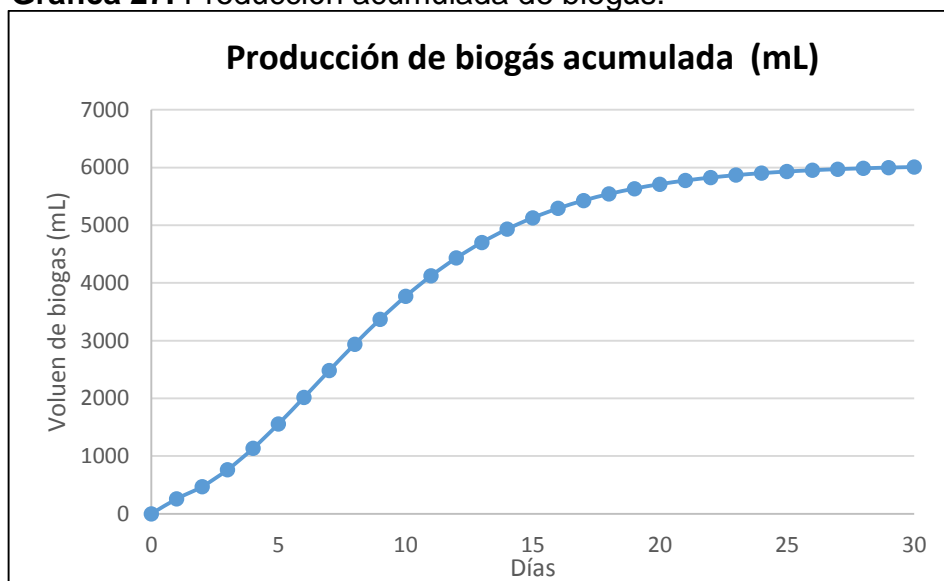
Parámetro	Unidades	Resultado
$P_{m\acute{a}x}$	mL	6051
$R_{m\acute{a}x}$	mL/día	469
$\lambda$	días	1.7

**Fuente:** Adaptado de DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. vol. 121, p. 100-104.

Los parámetros mostrados en la tabla 11 resultan de la solución de una regresión no lineal de la ecuación del modelo de Gompertz, partiendo de la producción de biogás acumulada y el tiempo como datos conocidos. La gráfica 27 representa el comportamiento del modelo para los resultados obtenidos en el artículo y se ajustan a la ecuación 1:

$$V_{biogas} = 6050.95 \exp\left(-\exp\left(\frac{469 \exp(1)}{6050.95} (1.7 + t) + 1\right)\right)$$

**Gráfica 27.** Producción acumulada de biogás.



<sup>82</sup> *Ibíd.*, p. 102.

Los resultados experimentales junto con las condiciones de operación trabajadas en el artículo, como el material cargado al digester de 120g de R.O secos y 1480g de H<sub>2</sub>O, el contenido de carbono de 49,96% (4,99mol C en R.O) y la composición del biogás que se haya interpolando a 35°C para dar un resultado fue de 60,65% CH<sub>4</sub> y 37,15% CO<sub>2</sub><sup>83</sup>, serán utilizados para determinar la velocidad de reacción del proceso y la conversión, las cuales se asumirán iguales para el dimensionamiento del reactor CSTR.

La velocidad de reacción se determinó a partir de la producción diaria de biogás y el contenido de CH<sub>4</sub> en el mismo, pues se calcularon las moles de CH<sub>4</sub> presentes en el biogás producido para cada día y se dividió en el volumen del reactor, Suponiendo que la producción de biogás tendrá el mismo contenido de metano durante todo el tiempo de retención. Finalmente la conversión obtenida se planteó en términos de las moles de carbono del influente convertidas únicamente en metano, partiendo de un balance atómico de carbono. El ANEXO P presenta los cálculos matemáticos y resultados obtenidos.

En la tabla 12 se muestran los resultados de la producción de biogás acumulada para un tiempo de retención 30 días, las moles totales de CH<sub>4</sub> presentes en el gas, la velocidad de reacción y la conversión del proceso.

**Tabla 12.** Resultados a partir de B. Deepnraj, V. Sivasubramanian y S. Jayaraj.

Tiempo (días)	V acum. gas (mL)	mol CH <sub>4</sub> acum.	r (molCH <sub>4</sub> /mL día)	X
30	6008,5	0,149	7,5E-5	0,0299

**Fuente:** Adaptado de DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. vol. 121, p. 100-104.

Con base en los resultados de la tabla 12, se realiza el dimensionamiento del biodigester como se muestra a continuación.

### 4.3 ECUACIONES DE DISEÑO

Para determinar el volumen del biodigester se emplearon las ecuaciones de diseño para reactores por lotes y continuos. Además se realizó el balance de materia que permitirá fijar los flujos de entrada y salida del reactor. Se tomó la estimación de generación diaria de R.O de la plaza (Tabla 4) y la caracterización de R.O e inóculo (ANEXO H y J) como datos de entrada y como datos de salida se utilizó la

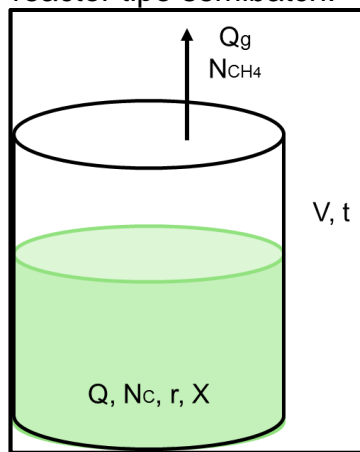
<sup>83</sup> DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Op. Cit., p. 100-104.



composición del biogás, la conversión y la velocidad de reacción obtenidas en el artículo por DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. (Tabla 12).

**4.3.1 Reactor tipo semibatch.** El funcionamiento de este reactor se basa en la carga de material y su posterior cierre con una única salida para el gas producido durante un tiempo determinado. No existe ningún otro flujo de entrada o salida del reactor. En la figura 16 se muestra el esquema para este reactor, planteado en términos de un balance atómico de carbono y el metano producido durante el proceso.

**Figura 16.** Esquema reactor tipo semibatch.



Donde:

$Q$  → Carga del sustrato alimentado (R.O+Agua) (mL)

$Q_g$  → Flujo de salida del gas (mL)

$N_c$  → Moles de carbono en la carga alimentada

$N_{CH_4}$  → Moles de metano en el biogás

$r$  → Velocidad de reacción (mol  $CH_4$ /mL día)

$X$  → Conversión

$V$  → Volumen del reactor (mL)

$t$  → Tiempo (días)

Para determinar la velocidad de reacción en un proceso llevado a cabo en un reactor semibatch, se utiliza la ecuación 2, que corresponde a la ecuación de diseño de un reactor intermitente, batch o semibatch.

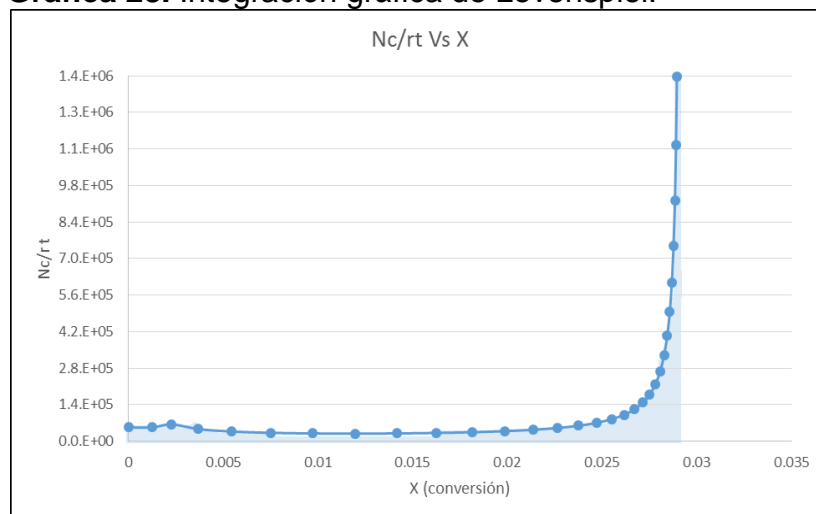
**Ecuación 2.** Ecuación de diseño para reactor intermitente.

$$t = N_C \int_0^X \frac{dX}{-rV}$$

**Fuente:** SCOTT FOGLER, H. Elementos De Ingeniería De Las Reacciones Químicas. Cuarta ed. México: PEARSON EDUCATION, 2008. p. 70.

Como se observa en la ecuación 2, se tiene una integral en función de la conversión del proceso, por lo tanto se utiliza el método de integración gráfica<sup>84</sup> para determinar el volumen del reactor batch y posteriormente relacionar la gráfica con la ecuación de diseño de un reactor continuo y así determinar el volumen de éste (gráfica 28).

**Gráfica 28.** Integración gráfica de Levenspiel.

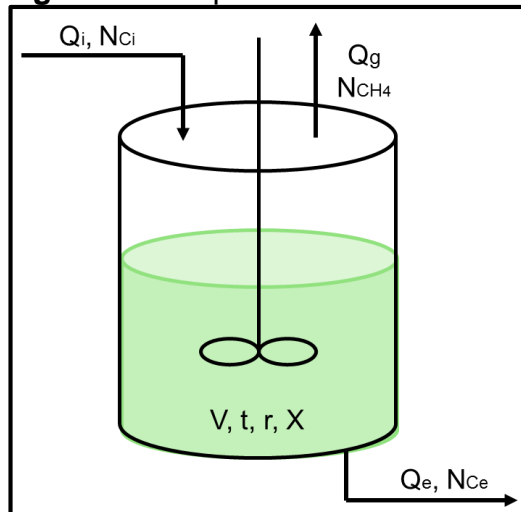


De la gráfica 28, se observa que cuando la conversión es cercana a 3%, se presenta un comportamiento asintótico en la función, haciendo así que la conversión permanezca constante y asimismo el volumen del reactor, pues el área bajo la curva, que se encuentra sombreada, corresponde al volumen del reactor por lotes que para el artículo corresponde a 2L, la conversión máxima obtenida, de C en  $CH_4$ , fue de 2,99% y la velocidad de reacción para el día 30 fue de  $7,5E-05 \text{ mol}CH_4/\text{mLdía}$ . Además es posible relacionar la función graficada con la ecuación de diseño de un reactor continuo, lo cual será mostrado a continuación.

<sup>84</sup> SCOTT FOGLER, H. Elementos De Ingeniería De Las Reacciones Químicas. Cuarta ed. México: PEARSON EDUCATION, 2008. p. 70.

**4.3.2 Reactor tipo CSTR.** El reactor CSTR (continuous stirred-tank reactor) en estado estacionario es aquel en el que el alimento, producto y subproductos entran y salen del sistema continuamente (en este caso una vez al día). Es considerado un reactor de mezcla completa ya que se asume uniformidad en la concentración. En la figura 17 se muestra el esquema del CSTR, con los flujos respectivos del material de entrada y salida.

**Figura 17.** Esquema reactor CSTR.



En donde:

$Q_i$  → Flujo del sustrato alimentado (R.O+Agua)

$Q_e$  → Flujo de salida del efluente (mL/día)

$Q_g$  → Flujo de salida del biogás (mL/día)

$N_{C_i}$  → Moles de carbono en el influente

$N_{C_e}$  → Moles de carbono en el efluente

$N_{CH_4}$  → Moles de metano en el biogás

La ecuación 3, representa la ecuación de diseño para un reactor de tipo CSTR, la cual es utilizada para determinar el volumen del reactor y se encuentra en términos del flujo inicial de carbono y su conversión durante el proceso.

**Ecuación 3.** Ecuación de diseño para un CSTR.

$$V = \frac{F_{C_o} (X_{salida} - X_{entrada})}{-r}$$

**Fuente:** SCOTT FOGLER, H. Elementos De Ingeniería De Las Reacciones Químicas. Cuarta ed. México: PEARSON EDUCATION, 2008. p. 70.

Donde:

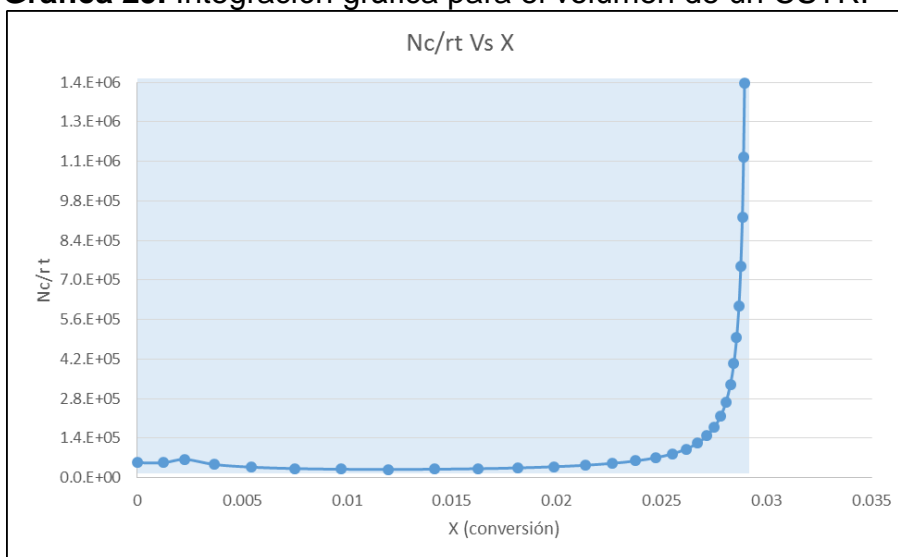
$F_{C_o}$  → Flujo inicial de carbono (mol C/día)

$X_{entrada}$  → Será 0 ya que no hay conversión a la entrada del reactor.

$X_{salida}$  → Será la conversión de todo el proceso

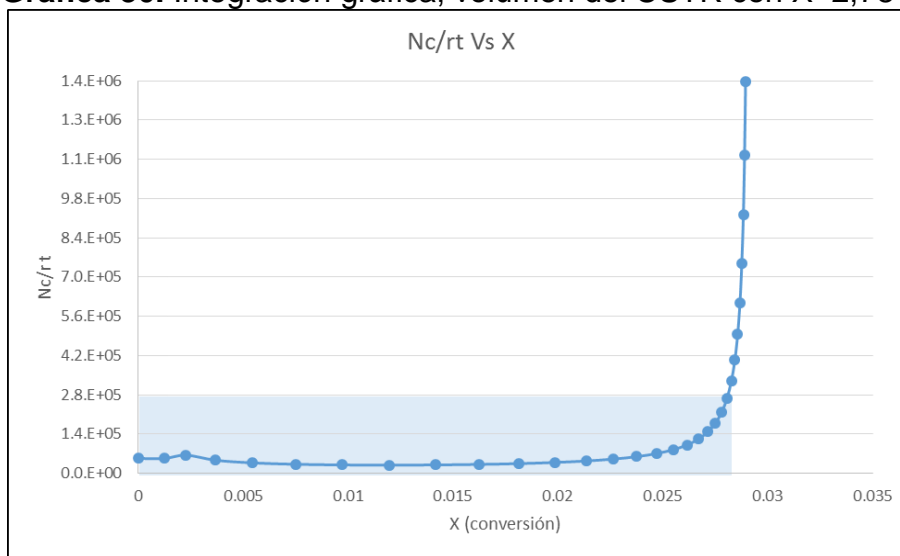
Para relacionar las ecuaciones de diseño de un reactor por lotes y un CSTR, se observa la gráfica 28, la cual representa la conversión para la digestión anaerobia durante 30 días. El área bajo la curva, es decir, la integral de la función representa el volumen necesario para el reactor por lotes, mientras que el volumen del reactor CSTR corresponde al área del rectángulo que se forma en el último punto de la función que corresponde a la máxima conversión. Esto se representa en el área sombreada de la gráfica 29.

**Gráfica 29.** Integración gráfica para el volumen de un CSTR.



Como se observa en la gráfica 29, un aumento pequeño en la conversión aumenta significativamente el volumen del reactor, por lo tanto se decide elegir una conversión de 2,78% para un tiempo de retención de 21 días como se muestra en la gráfica 29. Por lo tanto la velocidad de reacción será la determinada en ese tiempo que es  $7,6E-7 \text{ molCH}_4/\text{mLdía}$ , y se procede a calcular el volumen del reactor utilizando la ecuación 4. Para esto es necesario conocer las moles de carbono alimentadas al reactor, las cuales serán calculadas a partir de la generación diaria de R.O de la plaza y haciendo uso del contenido de carbono obtenido de la caracterización de R.O (ANEXO H) y finalmente se plantea el balance de materia para el reactor.

**Gráfica 30.** Integración gráfica, volumen del CSTR con  $X=2,78\%$



La conversión de 2,78% fue elegida, ya que como se observa en la gráfica 30, el volumen del reactor aumenta con la conversión, y al llegar al rango de 2,50% y 3,0% de conversión, se incrementa exponencialmente el volumen del reactor sin mostrar un aumento significativo en la conversión. Por esta razón se decide elegir una conversión que disminuya el volumen del reactor y permita obtener una conversión similar a la máxima.

#### 4.4 VOLUMEN DE BIODIGESTOR

Para hallar el volumen del reactor, se debe plantear el balance de materia fijando la concentración de sólidos en 7,5% y la relación inóculo:sustrato de 3:1. Cabe resaltar, que el inóculo (estiércol bovino fresco) solo se adicionará para el arranque del biodigestor ya que aporta un alto contenido de carga microbiana, por lo tanto, como se dimensionará el CSTR en estado estacionario, el inóculo no se incluirá dentro de la carga diaria al reactor.

Para determinar el contenido de sólidos totales y volátiles de los R.O y el inóculo, se realizó un promedio aritmético de la caracterización 1 y 2 (ANEXO H) de R.O, se decide despreciar la tercera caracterización ya que fue la que presentó resultados con mayor variación a los dos anteriores y a lo reportado en la literatura, por otro lado para el inóculo se realizó un promedio aritmético de las 3 caracterizaciones realizadas (ANEXO J).

Desarrollando el balance de materia con las condiciones planteadas anteriormente, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 13.

**Tabla 13.** Condiciones de carga al CSTR.

<b>Condiciones de carga al CSTR</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Residuos orgánicos</b>	<b>Inóculo</b>
ST (%) BH	12,92	19,01
SV(%) BH	11,05	23,89
Carga al digestor (m <sup>3</sup> ) BH	1,363	2,38
Carga al digestor (m <sup>3</sup> ) BS	0,18	0,57*
ST de carga al biodigestor (%)	7,5	
I:S**	3:1	
Volumen H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> /día)	6,18	
Volumen total de carga (m <sup>3</sup> )	9,92	
Volumen R.O+Agua (m <sup>3</sup> /día)	7,54	

\* Solo se adiciona para arrancar el biodigestor y se tiene en cuenta el volumen que ocupa para dimensionar el mismo.

\*\* I:S está basada en la relación de gSV.

A partir de lo anterior, se determinan las moles de carbono cargadas al biodigestor (ecuación 4) para así emplear la ecuación 3, diseño de un reactor CSTR.

**Ecuación 4.** Moles de carbono en el influente.

$$\text{mol } C_i = \frac{R \cdot O_i(g) X_C}{PM_C \left( \frac{g}{mol} \right)}$$

Donde:

Se asume una densidad de 1g/mL para los R.O.

$X_C$  → Fracción de carbono en R.O (0,0413)

$PM_C$  → Peso molecular del carbono (12,01g/mol<sup>85</sup>)

Conociendo la generación de R.O diaria de 1363kg en base húmeda, se calculan las moles de C presentes en el material cargado y se obtiene un total de 4.687molC.

Finalmente para el volumen del reactor se utiliza la ecuación 4 y se obtiene lo mostrado a continuación.

$$V = \frac{4687 \frac{\text{molC}}{\text{día}} (0,0278)}{7,6 \times 10^{-7} \frac{\text{mol C}}{\text{mL día}} \left( \frac{10^6 \text{mL}}{1 \text{m}^3} \right)}$$

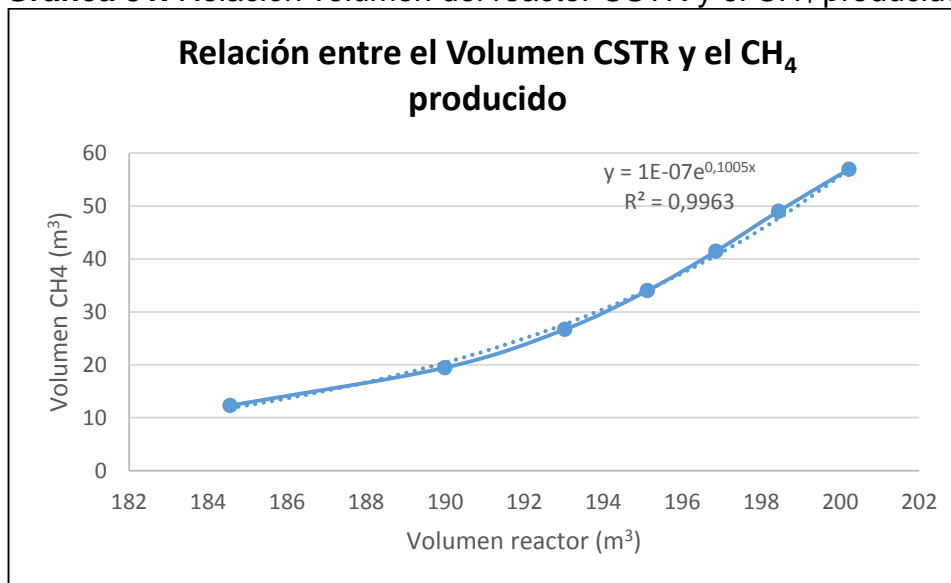
$$V = 172,25 \text{ m}^3$$

El volumen del reactor también se determinó mediante los resultados reportados por la investigación realizada por Hilkiah Igoni, A., Abowei, M. F. N., Ayotamuno, M. J. y Eze, C. L.<sup>86</sup>, en donde se realiza una evaluación comparativa para digestores de tipo batch y CSTR para la producción de biogás a partir de residuos sólidos municipales a condiciones similares por medio de modelos matemáticos utilizando parámetros cinéticos determinados por los mismos autores y estableciendo la relación entre el crecimiento microbiano y la concentración de sustrato partiendo de la cinética de Monod. En la gráfica 31 se muestran los resultados obtenidos para modelar la producción de metano en función del volumen del reactor.

<sup>85</sup> MERCK MILLIPORE. Carbón Activo. [En Línea] [https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Charcoal-activated,MDA\\_CHEM-102183?Referrer-URL=https%3A%2F%2Fwww.google.com.co%2F](https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Charcoal-activated,MDA_CHEM-102183?Referrer-URL=https%3A%2F%2Fwww.google.com.co%2F). Citado el día 30 de mayo de 2017.

<sup>86</sup> HILKIAH IGONI, A., et al. Comparative Evaluation of Batch and Continuous Anaerobic Digesters in Biogas Production from Municipal Solid Waste using Mathematical Models. Septiembre. vol. X, p. 1-12

**Gráfica 31.** Relación volumen del reactor CSTR y el CH<sub>4</sub> producido.



En donde la ecuación 5 muestra la función exponencial planteada para el modelo. El volumen de metano y del reactor se encuentra en m<sup>3</sup>.

**Ecuación 5.** Producción de metano en función del volumen del reactor.

$$V_{CH_4} = 1E - 0,7e^{0,1005V_R}$$

**Fuente:** HILKIAH IGONI, A., et al. Comparative Evaluation of Batch and Continuous Anaerobic Digesters in Biogas Production from Municipal Solid Waste using Mathematical Models. Septiembre. vol. X, p. 9.

El volumen de metano producido se determina con la conversión esperada (2,78%) y las moles de carbono alimentadas (4689mol C). Obteniendo que la producción de metano equivale a 130,38mol CH<sub>4</sub> por día, lo cual es 3,19m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> por día.

Finalmente, despejando el volumen del reactor y reemplazando los datos de la ecuación 6, se obtiene un volumen de reactor de 171,92m<sup>3</sup>.

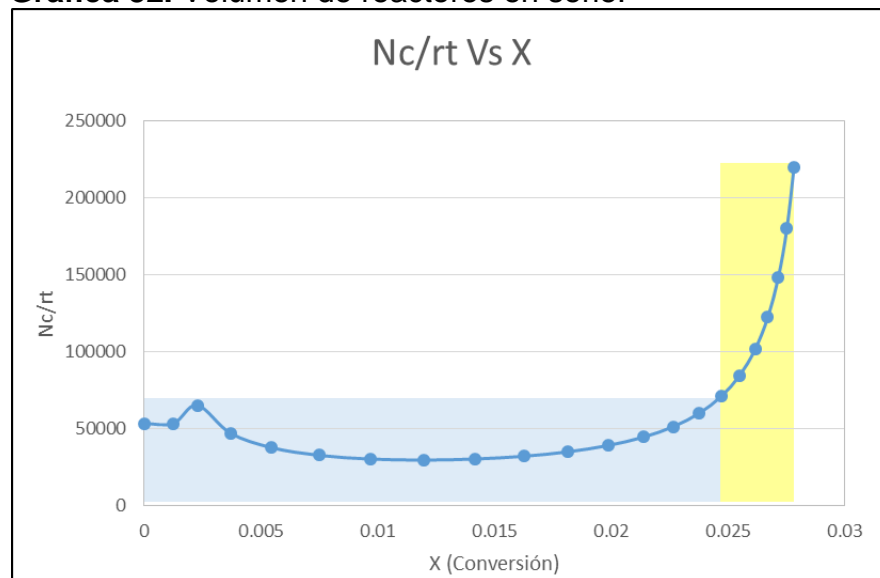


$$V_R = \frac{\text{Ln}\left(\frac{3,19}{1E-07}\right)}{0,1005} = 171,92m^3$$

Al comparar los valores de volumen de reactor obtenido por el modelo de Gompertz y el modelo detallado planteado por Hilkiah Igoni, A., Abowei, M. F. N., Ayotamuno, M. J. y Eze, C. L., se encuentra que son cercanos, pues se obtuvo un volumen de 172,25 m<sup>3</sup> y 171,92m<sup>3</sup> respectivamente.

Sin embargo, se decide dividir el volumen del reactor en dos reactores en serie<sup>87</sup> ya que así puede disminuir el volumen de construcción de un solo reactor. Para esto, se tiene en cuenta la gráfica 32 que muestra la división del reactor.

**Gráfica 32.** Volumen de reactores en serie.



El área sombreada de color azul claro y amarillo corresponden a cada reactor, en donde el volumen de cada uno será de 49,4m<sup>3</sup> y 19,3m<sup>3</sup> respectivamente y se tendrá un ahorro en volumen de 103,9m<sup>3</sup>. Para determinar el volumen de cada reactor se empleó la ecuación 3 y los resultados reportados en el ANEXO P. En la figura 18 se muestra la configuración de los reactores en serie.

<sup>87</sup> LEVENSPIEL, Octave. Reactores De Tanque Agitado De Tamaños Diferentes En Serie. Ingeniería De Las Reacciones Químicas. 3ra ed. México: LIMUSA WILEY, 2004. p. 131-135.

➤ Reactor 1:

$$V = \frac{4687 \frac{\text{molC}}{\text{día}} (0,0247)}{2,3 \times 10^{-6} \frac{\text{mol C}}{\text{mL día}} \left( \frac{10^6 \text{mL}}{1 \text{m}^3} \right)}$$

$$V = 49,4 \text{ m}^3$$

➤ Reactor 2:

$$V = \frac{4687 \frac{\text{molC}}{\text{día}} (0,0278 - 0,0247)}{7,6 \times 10^{-7} \frac{\text{mol C}}{\text{mL día}} \left( \frac{10^6 \text{mL}}{1 \text{m}^3} \right)}$$

$$V = 19,3 \text{ m}^3$$

Como se mencionó anteriormente, el reactor se inicia con una carga de inóculo para aportar consorcios microbianos al sistema y así favorecer la producción de biogás. Por lo tanto se tiene en cuenta el volumen de estiércol (tabla 13) que corresponde a  $2,38 \text{m}^3$  y se incluye esta cantidad al volumen determinado para un reactor, obteniendo así el primer biodigestor de  $51,8 \text{m}^3$  y el segundo de  $19,3 \text{m}^3$ .

Adicionalmente se debe tener en cuenta que el reactor será construido en polietileno de alta densidad, por lo tanto las dimensiones factibles para estos reactores son aquellas que se encuentran disponibles en el mercado que oscilan en un rango de 250 a 40.000 L. Por lo tanto el máximo volumen posible para los reactores será de  $40 \text{m}^3$ . Para que esto sea posible, se plantea dividir el reactor 1 en dos reactores en paralelo, los cuales trabajan a las mismas condiciones de operación como lo son los flujos de entrada y salida, la velocidad de reacción, la conversión y el tiempo de retención, y finalmente los dos reactores en paralelo estarán conectados en serie con el tercer reactor como se muestra en la figura 18.

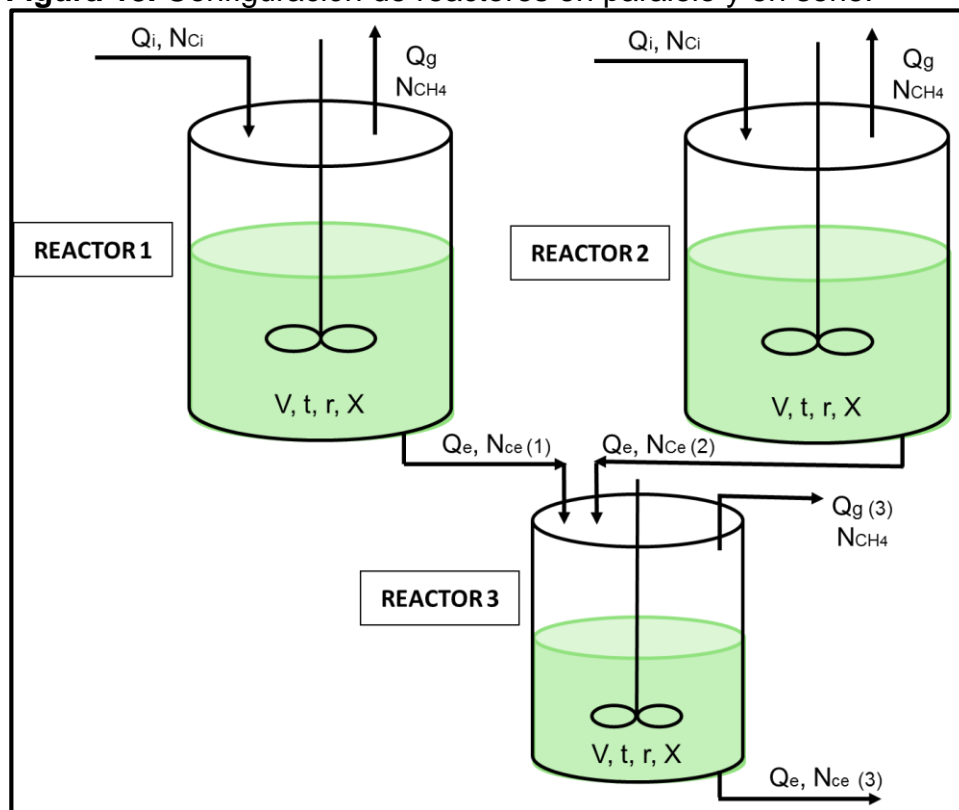
Adicionalmente, se determina que un 20%-30%<sup>88</sup> del volumen del reactor debe permanecer libre para el almacenamiento del biogás a producir, por esta razón el volumen de los reactores aumenta a  $30 \text{m}^3$  para los dos primeros (paralelo) y  $23,16 \text{m}^3$  para el tercer reactor (serie).

Concluyendo así que se utilizarán dos reactores de  $30 \text{m}^3$  y uno de  $25 \text{m}^3$ .

---

<sup>88</sup> BERNAL VÉLEZ, Daniela y QUINTERO GARZÓN, Daniela. Desarrollo De Una Propuesta Para La Mejora De Un Modelo De Biodigestor Anaerobio Convencional a Escala Banco a Partir De Una Mezcla De Residuos Bovinos y Lodos En La Finca El Recodo Tabio, Cundinamarca. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2016. p. 30-36.

**Figura 18.** Configuración de reactores en paralelo y en serie.



Teniendo el volumen de cada reactor, se plantea el balance de materia para ambos reactores. Se resalta que las condiciones de operación para el reactor 1 y 2 son exactamente iguales.

#### 4.5 BALANCE DE MATERIA

Para determinar los flujos de influente, efluente y biogás para cada reactor se plantea un balance de materia utilizando la conversión de carbono en metano de para cada reactor, que será de 2,47% y 0,31% (reactor1 y reactor 2) para completar una conversión global de carbono de 2,78%.

**4.5.1 Balance de materia reactor 1 y 2.** Para el influente de los reactores 1 y 2, como se observa en la tabla 14, se determinó un flujo de  $7,54\text{m}^3$  de la mezcla de agua y R.O, donde  $1,363\text{m}^3$  son de R.O y el resto corresponde a agua. Cabe aclarar que el flujo será dividido en partes iguales para ambos reactores.

Conociendo la conversión para este reactor y las moles de carbono en el influente, se determinan las moles de metano presentes en el biogás y posteriormente la cantidad en metros cúbicos de metano y biogás producidos como se muestra a continuación en la ecuación 6 y 7.

**Ecuación 6.** Moles de metano en el biogás.

$$mol CH_4 = mol C_i X_C$$

$$mol CH_4 = (4687)(0,0247)$$

$$mol CH_4 = 115,8 mol CH_4$$

**Ecuación 7.** Volumen de metano en el biogás.

$$V_{CH_4} = \frac{mol CH_4 PM_{CH_4} (1x10^{-6})}{\rho_{CH_4}}$$

Donde:

$PM_{CH_4}$  → Peso molecular del metano (16,04g/mol<sup>89</sup>)

$\rho_{CH_4}$  → Densidad del metano (0,000656g/mL<sup>90</sup>)

$1x10^{-6}$  → Factor de conversión de mL a m<sup>3</sup>

$$V_{CH_4} = \frac{(115,8)(16,04)(1x10^{-6})}{(0,000656)}$$

$$V_{CH_4} = 2,83m^3$$

Suponiendo que el biogás tendrá una composición de 60,65% de metano y 37,15% de dióxido de carbono<sup>91</sup>, como se muestra en el ANEXO P, se determina la cantidad de biogás producido por día que corresponde a 4,67m<sup>3</sup>.

En la tabla 14 se muestran los flujos de entrada y salida del reactor.

**Tabla 14.** Flujos de entrada y salida del biodigestor 1.

	Influyente	Efluyente	Biogas
Flujo (m <sup>3</sup> /día)	7,54	7,54	4,67

<sup>89</sup> Linde Gases Industriales. Hoja de seguridad del material (SDS) metano. [http://www.linde-gas.ec/internet.lg.lg.ecu/es/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20METANO343\\_98262.pdf?v=1.0](http://www.linde-gas.ec/internet.lg.lg.ecu/es/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20METANO343_98262.pdf?v=1.0). Citado el día 24 de mayo de 2017. p.3.

<sup>90</sup> Ibid., p.3.

<sup>91</sup> DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Op. Cit., p. 100-104.

Los flujos presentados en la tabla 14 serán divididos en los dos reactores en paralelo, alimentando así 3,77m<sup>3</sup> de R.O al día y esperando una producción de biogás de 2,33m<sup>3</sup> al día para cada reactor.

**4.5.2 Balance de materia reactor 3.** Para el balance de materia del reactor 3, se tomará como influente los resultados obtenidos para el efluente del reactor 1 y 2 ya que éstos están conectados en serie, y se utilizan las ecuaciones 6 y 7 para determinar la composición de metano en el biogás.

$$molCH_4 = (4571)(0,0031)$$

$$mol CH_4 = 14,17 mol CH_4$$

$$V_{CH_4} = \frac{(14,17)(16,04)(1 \times 10^{-6})}{(0,000656)}$$

$$V_{CH_4} = 0,35m^3$$

Finalmente, en la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos del balance de materia para el reactor 2.

**Tabla 15.** Flujos de entrada y salida del biodigestor 2.

	<b>Influente</b>	<b>Efluente</b>	<b>Biogas</b>
Flujo (m <sup>3</sup> /día)	7,54	7,54	0,58

Como se observa en al tabla 15, el flujo de biogás esperado para el rector 3 es de 0,58m<sup>3</sup>, para obtener un total de producción de biogás de 5,25m<sup>3</sup> que posee un poder calorífico de 6.5kWh/m<sup>3</sup> de biogás y por lo tanto será capaz de generar aproximadamente 34,125kWh.

Los biodigestores deben ser cilíndricos para evitar espacios muertos, reduciendo así la corrosión y permitiendo que las corrientes de fluido ocupen todo el espacio dentro del reactor y no se presente acumulación de materia en su interior. Esta configuración geométrica permite una distribución homogénea de la temperatura lo que ayuda a que haya una mejor transferencia de calor en el material cargado<sup>92</sup>.

<sup>92</sup> HERNÁNDEZ, Gabriel y MORALES, Jorge. Diseño, construcción y montaje de un reactor discontinuo con reflujo citado por Ortega Valbuena, Paola Margarita y Pulido Valero, Andrea en Desarrollo De Un Montaje Por Etapas A Nivel Banco Para La Obtención De Biogás A Partir De Residuos Vegetales, Bogotá, D.C. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2014. p. 42.

**4.5.3 Biodigestores.** Los reactores a utilizar son los que se muestran en las figuras 19 y 20, además se especifican sus dimensiones de altura y diámetro.

**Figura 19.** Biodigestor de 30m<sup>3</sup>.



**Fuente:** Distribuidor Nacional. Tanque industrial. [En Línea] [Citado el día 28 de junio de 2017]. Disponible en: <https://distribuidornacional.com/Item/TanqueIndustrialdeAlmacenamientodeAguas>.

Los reactores 1 y 2 tienen una altura de 5,61m y un diámetro de 2,77m.

**Figura 20.** Biodigestor de 25m<sup>3</sup>.



**Fuente:** Rotoplas. Tanque industrial. [En Línea] [Citado el día 28 de junio de 201]. Disponible en: <https://distribuidornacional.com/Item/DistribuidordeTanquesAlmacenamientoAguasQuimicos>.

El reactor 3 tiene una altura de 3,9m y un diámetro de 3,0m.

**4.5.4 Condiciones de operación.** En la tabla 16 se presenta el resumen de las condiciones de operación de cada reacción junto con sus dimensiones.

**Tabla 16.** Condiciones de operación para cada reactor.

<b>Parámetro</b>	<b>Reactor 1 y 2</b>	<b>Reactor 3</b>
V (m <sup>3</sup> )	30	25
Diámetro (m)	2.77	3
Altura (m)	5.61	3.9
Influyente (R.O+Agua m <sup>3</sup> /día)	3.77	7.54
Efluente (m <sup>3</sup> /día)	3.77	7.54
Biogás (m <sup>3</sup> /día)	2.34	0.58
Conversión C (%)	2.47	0.31
Velocidad de reacción (molCH <sub>4</sub> /mL día)	2.3E-06	7.6E-07
Tiempo de retención hidráulico (días)	7.96	3.32
CH <sub>4</sub> (%)	60.65	
CO <sub>2</sub> (%)	37.15	
Otros (%)	2.2	

Como consideraciones especiales para el proceso, se propone que para la implementación del proyecto, se evalúe a escala piloto seguido de la escala industrial, con el fin de determinar si los resultados reales corresponden a los esperados. Además, se propone una recirculación del agua que sale en el efluente ya que contiene una carga microbiana que favorece el proceso y además disminuye el consumo de agua para el mismo. Esta agua de recirculación se utiliza para diluir la carga de R.O y alcanzar el contenido de sólidos totales necesario para el proceso que corresponde a 7.5%.

Por lo tanto, asumiendo una eficiencia de remoción de sólidos totales de 49,44%<sup>93</sup>, se determina que el contenido de sólidos totales del efluente es de 3,79%, lo cual indica que en su mayoría se compone de agua, por lo tanto se plantea la posibilidad de recircular la mitad del flujo del efluente, es decir, 3,77m<sup>3</sup> de agua, tras una separación de fases. Sin embargo, se debe realizar un estudio detallado sobre la composición real del efluente.

Finalmente se planteó un sistema de agitación para los reactores que será mostrado a continuación.

<sup>93</sup> DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Op. Cit., p. 101.

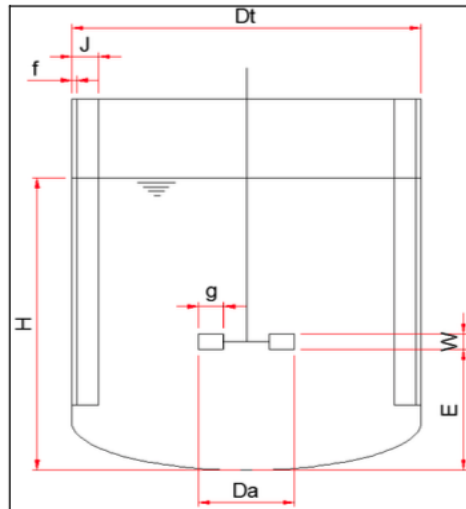
## 4.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN

El movimiento de la mezcla acelera y mejora la conducción y difusión. Existen dos clases de agitadores: los que generan corrientes paralelas al eje y corrientes tangenciales al eje. Los tres principales agitadores son: de hélice, de paleta y de turbina<sup>94</sup>.

Los agitadores de hélice impulsan el fluido hacia el fondo del tanque, donde allí la corriente fluye en dirección radial y se devuelve hacia la superficie. Los agitadores de paletas mantienen una corriente en dirección radial, por lo que no son apropiados para mantener sólidos en suspensión<sup>95</sup> y los de turbina tiene corrientes tangenciales y radiales que son los más utilizados en la industria química debido a que se pueden usar en intervalos grandes de viscosidades y velocidades, por lo tanto se desarrolló un agitador de tipo turbina con el siguiente modelo matemático.

**4.6.1 Dimensiones del agitador.** En la figura 21 se muestran las semejanzas geométricas que se asumen para el diseño del agitador.

**Figura 21.** Semejanzas geométricas de un agitador tipo turbina.



**Fuente:** CASTILLO URIBE, Vladimir. Diseño Y Cálculo De Un Agitador De Fluidos. Octubre. 2013.

<sup>94</sup> McCABE, Warren L., Smith Julian C. OPERACIONES BÁSICAS DE INGENIERÍA QUÍMICA, Reverte, 1981. p. 260.

<sup>95</sup> *Ibíd.*, p. 260.



Como se muestra en la figura 21, el diseño de un agitador<sup>96</sup> comprende variables que relacionan las dimensiones del tanque con el tipo de agitador como se muestra en la ecuación 8.

**Ecuación 8.** Relación dimensión del tanque y el agitador.

$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{1}{3}$	$\frac{J}{Dt} = \frac{1}{10}$	$\frac{H}{Dt} = 1$	$\frac{f}{Dt} = \frac{1}{50}$
$\frac{E}{Dt} = \frac{1}{3}$	$\frac{W}{Da} = \frac{1}{5}$	$\frac{g}{Da} = \frac{1}{4}$	

**Fuente:** CASTILLO URIBE, Vladimir. Diseño Y Cálculo De Un Agitador De Fluidos. Universidad del Bio-Bio, Octubre 2013. Pág, 30.

Donde:

$D_t$  → Diámetro del biodigestor [m]

$D_\alpha$  → Diámetro del agitador [m]

$J$  → Ancho de la placa deflectora [m]

$W$  → Ancho de la paleta del agitador [m]

$g$  → Largo de la paleta del agitador [m]

$E$  → Distancia fondo a base del agitador [m]

$f$  → Distancia entre placa deflectora y biodigestor [m]

$H$  → Altura del fluido cargado [m]

A partir de estas semejanzas geométricas se obtienen las dimensiones generales del agitador y las placas deflectoras para cada reactor que se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17.** Dimensiones a partir de las semejanzas geométricas.

Dimensiones (m)	Reactor 1 y 2	Reactor 3
$D\alpha$	0,923	1,000
$E$	0,923	1,000
$g$	0,231	0,250
$W$	0,185	0,200
$J$	0,277	0,300
$f$	0,055	0,060

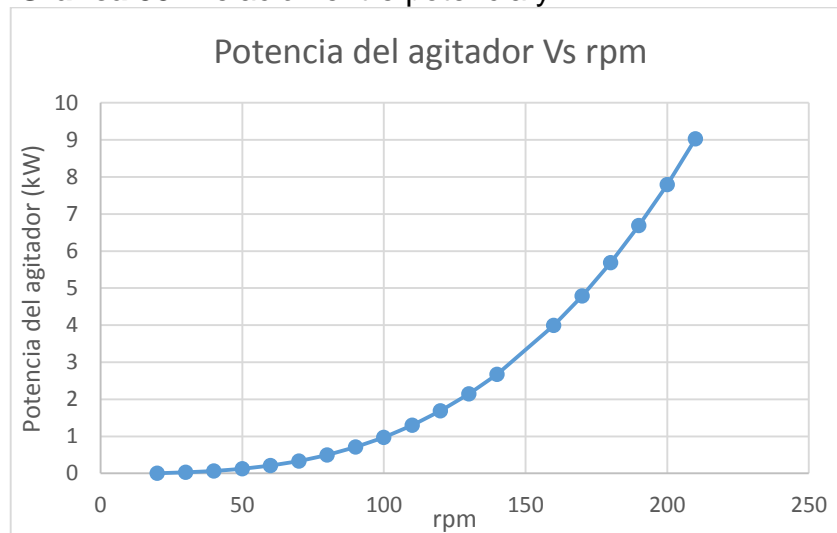
<sup>96</sup> CASTILLO URIBE, Vladimir. Diseño Y Cálculo De Un Agitador De Fluidos. Universidad del Bio-Bio, Octubre 2013. p. 30.

**4.6.2 Potencia del agitador.** Para que la agitación tenga lugar en el proceso, el fluido debe llegar a todos los espacios del biodigestor, teniendo una velocidad de circulación y una turbulencia adecuada.

Mediante el número de Reynolds que caracteriza el movimiento del fluido y el número de potencia, se conoce la energía requerida por la agitación para poder suministrar la potencia correcta que mantendrá el sistema<sup>97</sup>.

En primer lugar se calcula el número de Reynolds teniendo en cuenta las revoluciones por minuto requeridas por el sistema. Para determinar la velocidad de rotación (rps) para el agitador, se graficó la potencia y las rpm y se encontró que a medida que aumenta la velocidad de rotación (gráfica 33), se presenta un crecimiento exponencial en el consumo de potencia del agitador. Por lo tanto se fija un valor de rpm bajo, de 20rpm, para evitar un alto consumo energético que conlleva al aumento de costos de operación.

**Gráfica 33.** Relación entre potencia y RPM.



Teniendo la velocidad de rotación del agitador se determina el número de Reynolds mediante la ecuación 9<sup>98</sup>.

<sup>97</sup> Ibíd. p, 34.

<sup>98</sup> McCABE Warren, SMITH Julian C., HARRIOTT Peter, Operaciones unitarias en Ingeniería química 4a ed. Madrid, McGraw-Hill, 1991.

**Ecuación 9.** Número de Reynolds.

$$Re = \frac{D_{\alpha}^2 n \rho}{\mu}$$

**Fuente:** McCABE Warren, SMITH Julian C., HARRIOTT Peter, Operaciones unitarias en Ingeniería química 4a ed. Madrid, McGraw-Hill, 1991.

Donde:

$Re$  → Número de Reynolds

$D_{\alpha}$  → Diámetro del agitador [m]

$n$  → Revoluciones por segundo [20rpm=0,333rps]

$\rho$  → Densidad del fluido [1066,67kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  → Viscosidad del fluido [0,03 Pa\*s<sup>99</sup>]

Para el cálculo de número de Reynolds, la densidad de la mezcla se asume como el promedio de las densidades dadas en los análisis de resultados (ANEXO H) de los residuos orgánicos. La viscosidad de la mezcla, se toma con datos reportados en la literatura, debido a que no se determinó experimentalmente.

➤ Para reactores 1 y 2:

$$Re = \frac{(0,923)^2(0,333)(1066,67)}{(0,03)}$$
$$Re = 10086,87$$

➤ Para reactor 3:

$$Re = \frac{(1,000)^2(0,333)(1066,67)}{(0,03)}$$
$$Re = 11840,04$$

Teniendo el número de  $Re$  se determina el régimen obtenido que corresponde a un

---

<sup>99</sup> PATRON NOCHES, Alejandro José, RODRIGUEZ BERMEJO, Alfonso Andrés. Diseño De Un Bioreactor Para La Producción De Bioetanol A Partir De Desechos Orgánicos A Escala De Laboratorio, Universidad Autónoma del Caribe. Barranquilla, Marzo, 2014. p. 48.

régimen turbulento,  $Re > 10000^{100}$ . Teniendo en cuenta la gráfica 42 (ANEXO Q), se puede estimar el número de potencia ( $N_p$ ) por medio del cual se obtiene la potencia del agitador utilizando la ecuación 10.

**Ecuación 10.** Potencia del agitador.

$$P = N_p \rho n^3 D_\alpha^5$$

**Fuente:** McCABE Warren, SMITH Julian C., HARRIOTT Peter, Operaciones unitarias en Ingeniería química 4a ed. Madrid, McGraw-Hill, 1991.

En donde:

$P$  → Número total requerido de potencia [W]

$N_p$  → Número de potencia

$\rho$  → Densidad [1066,67 kg/m<sup>3</sup>]

$n$  → Velocidad de rotación [0,333rps]

$D_\alpha$  → Diámetro del agitador [m]

➤ Potencia del agitador para reactores 1 y 2:

$$P = (5)(1066,67)(0,333^3) (0,923^5)$$
$$P = 131,93 W = 0,132 kW$$

➤ Potencia del agitador para reactor 3:

$$P = (5)(1066,67)(0,333^3) (1,000^5)$$
$$P = 196,94W = 0,197 kW$$

**4.6.3 Potencia del motor.** Una vez se tiene la potencia que requiere el agitador, con la eficiencia del motor, que se define como 0,85<sup>101</sup>, se determina la potencia del motor necesario para operar el sistema utilizando la ecuación 11, como se muestra a continuación.

---

<sup>100</sup> CASTILLO URIBE, Vladimir. Diseño Y Cálculo De Un Agitador De Fluidos. Universidad del Bio-Bio, Octubre 2013, Chile. p. 35.

<sup>101</sup> RICAURTE FREIRE, Luis Eduardo. Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. Guayaquil, Ecuador, 2016, p. 40.

**Ecuación 11. Potencia del motor.**

$$P_m = \frac{P}{\eta}$$

**Fuente:** RICAURTE FREIRE, Luis Eduardo. Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. Guayaquil, Ecuador, 2016, p. 40.

En donde:

$P_m$  → Potencia total requerida del motor [KW]

$\eta$  → Eficiencia del motor [0,85]

$P_M$  → Potencia requerida por el agitador [KW]

➤ Para reactores 1 y 2:

$$P_m = \frac{0,132kW}{0,85}$$

$$P_m = 0,155kW$$

➤ Para reactor 3:

$$P_m = \frac{0,197kW}{0,85}$$

$$P_m = 0,232kW$$

**4.6.4 Diámetro del eje del agitador.** El diámetro del eje del agitador y la resistencia del material deben tenerse en cuenta para poder tener un sistema de agitación dentro del reactor. El diámetro del eje se halla con las ecuaciones 12 y 13<sup>102</sup>.

---

<sup>102</sup> *Ibíd*, p. 41.

**Ecuación 12.** Determinación del Torque.

$$Tm = \frac{P}{w}$$

**Fuente:** RICAURTE FREIRE, Luis Eduardo. Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. Guayaquil, Ecuador, 2016, p. 41.

En donde:

$P$  → Potencia total requerida del agitador [W]

$w$  → Velocidad angular [rps en radianes]

$Tm$  → Torque medio [N\*m]

➤ Para reactores 1 y 2:

$$Tm = \frac{132}{(0,333)(2\pi)} = 63,08 Nm$$

➤ Para reactor 3:

$$Tm = \frac{197}{(0,333)(2\pi)} = 94,15 Nm$$

Teniendo el torque medio se determina el diámetro del eje del agitador, de la siguiente forma.

**Ecuación 13.** Diámetro del eje del agitador.

$$De = \left[ \frac{16 * \sqrt{3N_f}}{\pi} * \left( \frac{T_m}{S_y} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

**Fuente:** Ricaurte Freire, Luis Eduardo. Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. Guayaquil, Ecuador, 2016, p. 41.

En donde:

$D_e$  → Diámetro del eje del agitador [m]

$Tm$  → Torque medio [N\*m]

$N_f$  → Factor de seguridad [2,5<sup>103</sup>]

$w$  → Velocidad angular [rad]

$S_y$  → Resistencia a la fluencia del material [304\*10<sup>6</sup>Pa]

➤ Para reactores 1 y 2:

$$De = \left[ \frac{16 * \sqrt{3(2,5)}}{\pi} * \left( \frac{63,08}{304 * 10^6} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$De = 0,014m$$

➤ Para reactor 3:

$$De = \left[ \frac{16 * \sqrt{3(2,5)}}{\pi} * \left( \frac{94,15}{304 * 10^6} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$De = 0,016m$$

Finalmente se obtiene todo el diseño y funcionamiento del sistema de agitación para los reactores CSTR. En la tabla 18 se muestra el resumen de los parámetros determinados para cada reactor.

---

<sup>103</sup> *Ibíd.*, p. 41.

**Tabla 18.** Resumen dimensiones de reactores y agitadores.

Parámetro	Reactor 1 y 2	Reactor 3
V(m <sup>3</sup> )	30	25
Dt (m)	2.77	3,00
Da (m)	0.923	1.000
E (m)	0.923	1.000
g (m)	0.231	0.250
W (m)	0.185	0.200
J (m)	0.277	0.300
f (m)	0.055	0.060
Re	10086.87	11840.04
n (rps)	0.33	0.33
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1066.670	1066.670
$\mu$ (Pa*s)	0.03	0.03
$\eta$ (eficiencia)	0.85	0.85
P (kW)	0.1319	0.1969
Np	5	5
Pm (kW)	0.155	0.232
Tm (Nm)	63.05	94.13
w (rad)	2.092	2.092
Sy (Pa)	304e+06	304E+06
De (m)	0.014	0.016
Nf	2.5	2.5

## 4.7 EQUIPOS ADICIONALES

**4.7.1 Triturador.** Este equipo se utiliza para adecuar la carga alimentada al reactor como un pretratamiento de ésta, tiene como finalidad disminuir el tamaño de partícula de los residuos orgánicos generados diariamente por la plaza.

Se emplea una trituradora-picadora sertaneja Master NOGUEIRA (figura 22) con una capacidad de procesamiento de 3500-4000kg/h, 1400 a 2500rpm, consta de 3 cuchillas y 6 repicadoras y un motor eléctrico de 3,7kW.



**Figura 22.** Trituradora-picadora sertaneja Master NOGUEIRA.



**Fuente:** NOGUEIRA. Sertaneja Master. [En Línea] [Citado el 21 de Junio de 2017]. Disponible en: <[http://www.nogueira.com.br/es\\_producto.php?equipamento=40&SERTANEJA+MASTER.](http://www.nogueira.com.br/es_producto.php?equipamento=40&SERTANEJA+MASTER.)>.

**4.7.2 Bomba para semisólidos.** Este equipo es utilizado para el llenado del reactor 1 con el material de carga (agua y R.O) tras su trituración. La bomba tiene una potencia de 0,50HP o 0,368kW, 3450rpm y trabaja un flujo de 120L por minuto<sup>104</sup>.

**Figura 23.** Bomba para flujos semisólidos.



**Fuente:** EVANS, Tienda en línea oficial [En línea] [Citado el 24 de junio de 2017]. Disponible en: [http://www.evans.com.mx/Especificaciones\\_evans.aspx?Articulo=188&Familia=102&Categoria=106](http://www.evans.com.mx/Especificaciones_evans.aspx?Articulo=188&Familia=102&Categoria=106).

<sup>104</sup> EVANS, Tienda en línea oficial [En línea] [Citado el 24 de junio de 2017]. Disponible en: <[http://www.evans.com.mx/Especificaciones\\_evans.aspx?Articulo=188&Familia=102&Categoria=106](http://www.evans.com.mx/Especificaciones_evans.aspx?Articulo=188&Familia=102&Categoria=106)>

**4.7.3 Motor del agitador.** Este equipo se utiliza para permitir el funcionamiento del agitador. Se necesitan 3 motores, uno para cada reactor, en donde cada uno posee una eficiencia de 0,85, Para los motores que actúan en los reactores 1 y 2, su potencia debe superar los 0.155kW y el motor para el reactor 3 debe superar los 0.232kW con el fin de evitar sobrecalentar los motores teniendo una potencia igual a la requerida.

Como se muestra en la figura 24, se eligió un motor trifásico de alta eficiencia IE2,IP55(TEFC) con referencia 1LA 0,97-2YA60 de 3600rpm, una potencia de 3Hp, es decir, 2,2kW, con una eficiencia de 85.5%<sup>105</sup>.

**Figura 24.** Motor para el agitador.



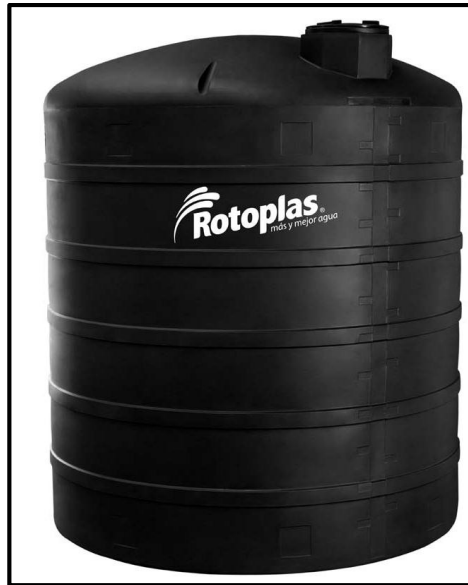
**Fuente:** Siemens, Lista de precios Colombia, Productos eléctricos industriales Tanques para Aguas y Químicos. [En Línea] [Citado el 7 de Julio de 2017]. Disponible en: <<http://www.industry.siemens.com/home/aan/es/colombia/Documents/2014/LP%20INDUSTRY%20BAJA%2030dic%202013.pdf>>

**4.7.4 Contenedor.** Se utilizan tanques de polietileno de alta densidad para recolectar el efluente, tienen un volumen de 10m<sup>3</sup>. En la figura 25 se muestra el tanque de almacenamiento en HDPE.

---

<sup>105</sup> Siemens, Lista de precios Colombia, Productos eléctricos industriales Tanques para Aguas y Químicos. [En Línea] [Citado el 7 de Julio de 2017]. Disponible en: <<http://www.industry.siemens.com/home/aan/es/colombia/Documents/2014/LP%20INDUSTRY%20BAJA%2030dic%202013.pdf>>

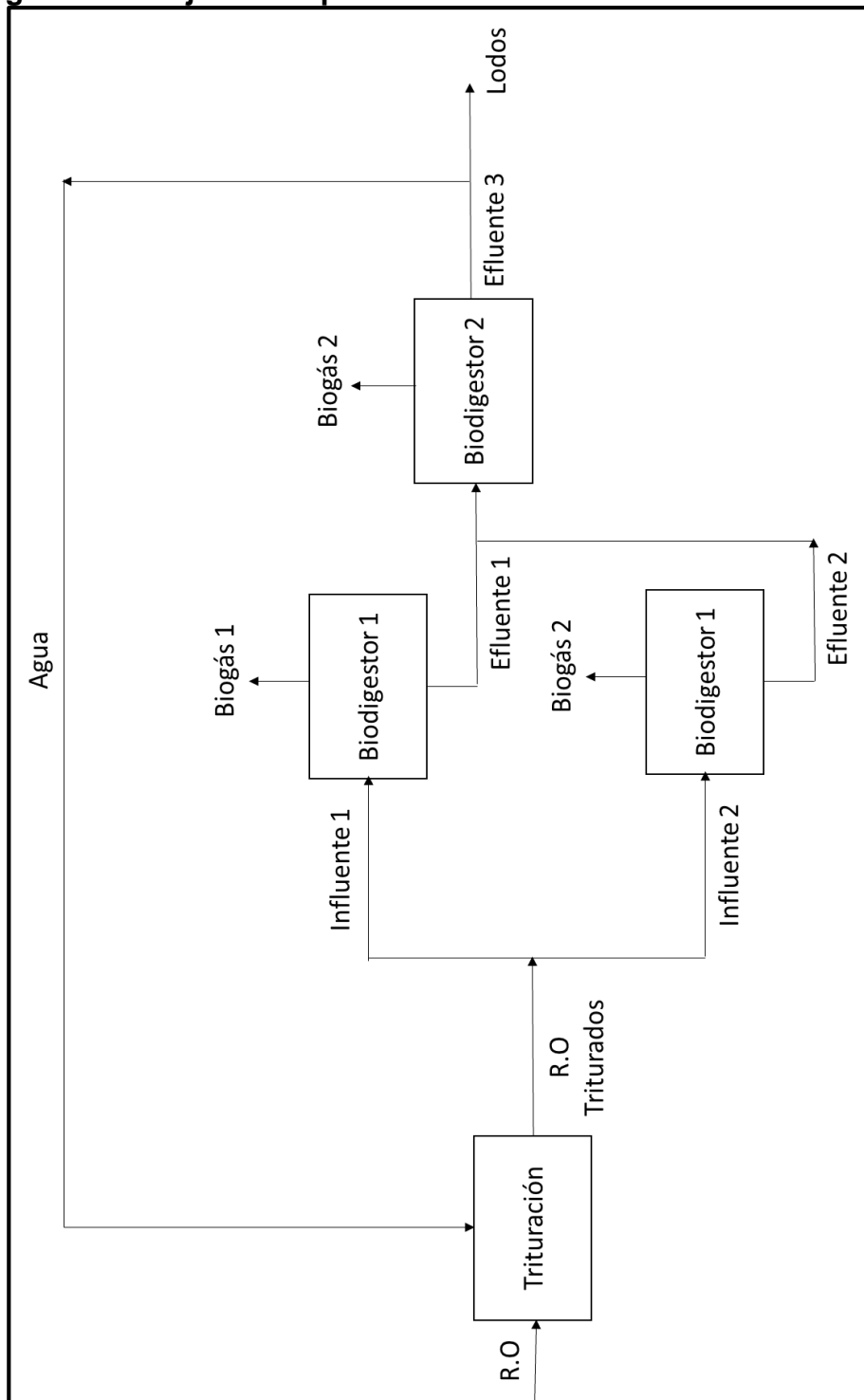
**Figura 25.** Tanque de almacenamiento en HDPE de 10m<sup>3</sup>.



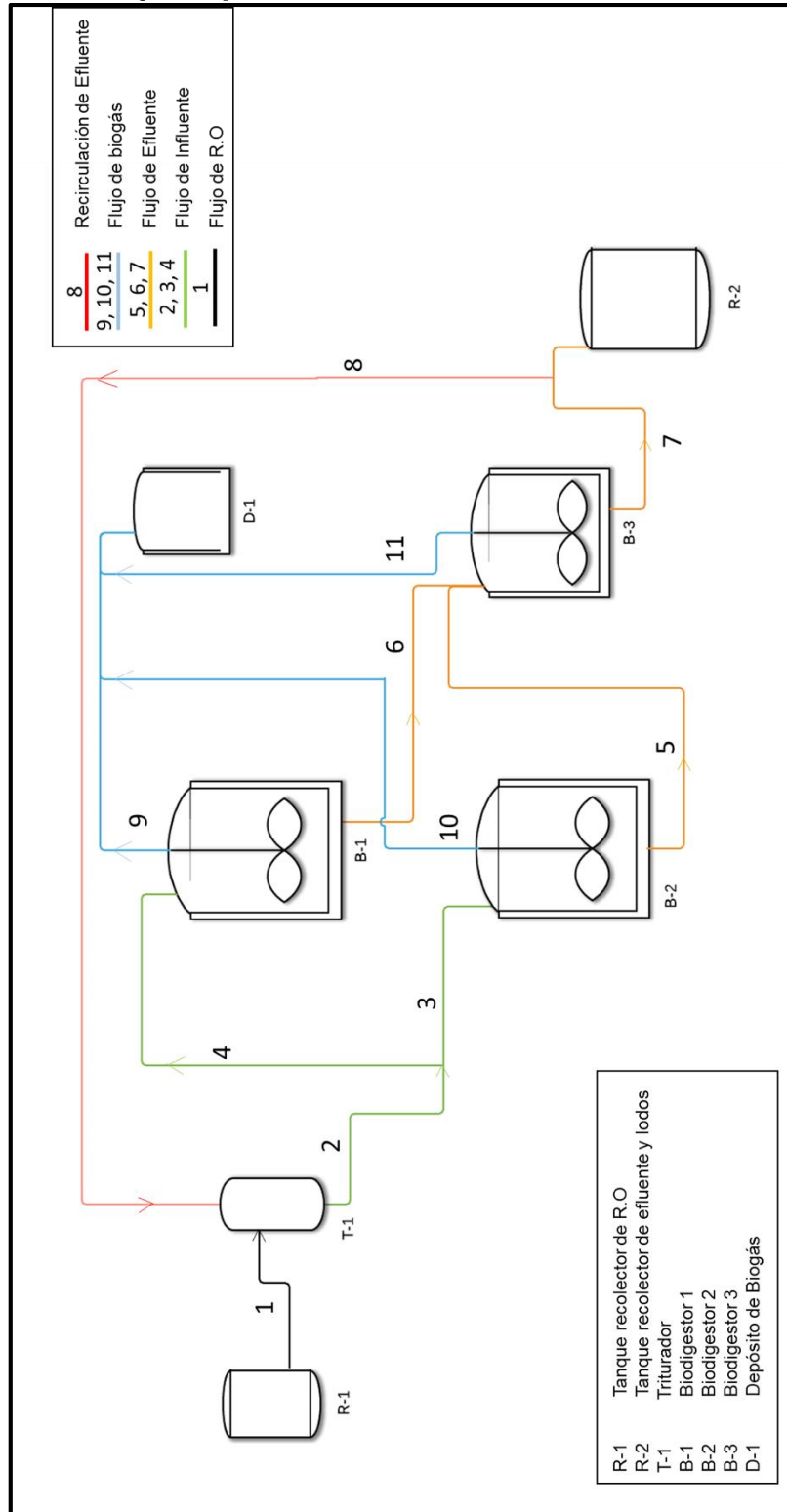
**Fuente:** Rotoplas. Tanques para Aguas y Químicos. [En Línea] [Citado el 1 de Julio de 2017]. Disponible en: <<http://www.rotoplas.com.mx/productos/almacenamiento/tanques-para-agua/quimicos/>>.

## 4.8 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS

### 4.8.1 Diagrama de flujo en bloques



## 4.8.2 Diagrama de flujo de proceso



## 5. ANÁLISIS FINANCIERO

El siguiente análisis financiero presenta la estimación de costos de producción de biogás para la implementación y operación de los biodigestores en paralelo y en serie planteados con las especificaciones mencionadas anteriormente, incluyendo los equipos necesarios para el pretratamiento del sustrato y la recolección de biogás. Se aclara que las conexiones entre los equipos y el costo de obras civiles, adecuación de terrenos y estudio geográfico no fueron tomadas en cuenta para el análisis de costos ya que no se incluyó en el alcance del proyecto.

Se desarrolla el análisis de costos de inversión (CAPEX) y de costos de operación (OPEX) para estimar los costos de producción de biogás.

### 5.1 ANÁLISIS DE INVERSIÓN (CAPEX)

CAPEX por sus siglas en inglés Capital Expenditure o gastos de capital, es la cantidad de dinero utilizado para adquirir o mejorar los activos productivos, como edificios, vehículos, maquinaria y equipos, con el fin de aumentar la capacidad o eficiencia de una empresa<sup>106</sup>. En este caso se incluirán únicamente los costos de inversión en equipos para el proceso de producción de biogás.

**5.1.1 Inversión para la producción de biogás.** Los valores reportados en la tabla 19 se obtuvieron de cotizaciones realizadas para todos los equipos.

**Tabla 19.** Costos de equipos.

Equipos	Inversión		
	Costo Unitario (COP)	Unidades	Valor Total (COP)
Biodigestor 1 y 2	\$ 22'378,021	2	\$ 44,756,042
Biodigestor 3	\$ 8'341,080	1	\$ 8,341,080
Trituradora picadora	\$ 1'855,500	1	\$ 1,855,500
Bomba	\$ 746,306	1	\$ 746,306
Contenedor	\$ 3'323,139	2	\$ 6,646,279
Motor	\$ 1'005,000	3	\$ 3'015,000
<b>Total</b>			\$ 65'360,206

Los costos de instalación como se dijo anteriormente, no se presentan en el proyecto debido que requiere un estudio de obras civiles que no se incluyen en el desarrollo de este proyecto. Sin embargo, para próximas investigaciones, se sugiere utilizar la tecnología de reactores subterráneos, que consiste en realizar una

<sup>106</sup> ENCICLOPEDIA FINANCIERA. Capex. [En Línea] [C2 de junio de 2017]. Disponible en: <http://www.encyclopediainanciera.com/de-finicion-capex.html>.

excavación para cubrir cierta la altura de biodigestor, con el fin de ocupar menos espacio y conectar y controlar el proceso con mayor facilidad.

## 5.2 ANÁLISIS DE OPERACIÓN (OPEX)

OPEX por sus siglas en inglés Operating Expenses, es un costo continuo para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema<sup>107</sup>.

Se establece el valor de la mano de obra, insumos e implementos, agua de proceso y consumo energético.

**5.2.1 Costos directos de producción.** Corresponden a todas las materias primas utilizadas para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de la PDM Siete de Agosto. Los costos directos están dados por el consumo de agua que en este caso se asumió de 6m<sup>3</sup>. Cabe aclarar que realizar la recirculación de agua disminuirá los costos de producción significativamente. (Tabla 20).

**Tabla 20.** Costos directos de producción.

Costos directos de producción					
Concepto	Unidad	Valor	Unitario (COP)	Total/Mes (COP)	Total/año (COP)
Residuos orgánicos	kg		-	-	-
Agua	m <sup>3</sup>	\$	4,696	\$ 845,280	\$ 10,143,360
<b>Total/año</b>				\$ 845,280	\$ 10,143,360

**5.2.2 Costos indirectos de producción.** En la tabla 21 se observan los costos de los indirectos de producción que se componen de la energía eléctrica que consumen los equipos para su operación y finalmente en la tabla 22 los costos de mano de obra.

**Tabla 21.** Costos indirectos de producción.

Costos indirectos de producción					
Concepto	Unidad	Valor	Unitario (COP)	Total/Mes (COP)	Total/año (COP)
Energía eléctrica	kW	\$	445.05	\$ 306,069.786	\$3,672,837
<b>Total/año</b>				\$306,069.786	\$3´672,837

<sup>107</sup> ENCICLOPEDIA FINANCIERA. Opex. [En Línea] [Citado el 2 de junio de 2017]. Disponible en: <http://www.encyclopediainanciera.com/de-finicion-opex.html>.

**Tabla 22.** Costos de mano de obra.

<b>Costo mano de obra Operarios</b>			
	<b>Valor (COP)/mes</b>	<b>2 Operarios</b>	<b>Costo anual (COP)</b>
Sueldo	\$737.717,00	\$1,475,434.00	\$17,705,208.00
Auxilio de transporte	\$83.140,00	\$166,280.00	\$1,995,360.00
Prima	\$61.476,42	\$122,952.83	\$1,475,434.00
Vacaciones	\$30.780,21	\$61,476.42	\$737,717.00
Cesantías	\$61.476,42	\$122,952.83	\$1,475,434.00
Interés a las cesantías	\$614,76	\$1,229.53	\$14,754.34
<b>Total</b>	<b>\$975.204,81</b>	<b>\$1,950,325.61</b>	<b>\$23,403,907.34</b>
<b>Costo mano de obra Ingeniero</b>			
	<b>Valor (COP)/mes</b>	<b>1 Ingeniero</b>	<b>Costo anual (COP)</b>
Sueldo	\$3,000,000.00	\$3,000,000.00	\$36,000,000.00
Auxilio de transporte	-	-	-
Prima	\$250,000	\$250,000.00	\$3,000,000.00
Vacaciones	\$125,000.00	\$125,000.00	\$1,500,000.00
Cesantías	\$250,000.00	\$250,000.00	\$3,000,000.00
Interés a las cesantías	\$2,500.00	\$2,500.00	\$30,000.00
<b>Total</b>	<b>\$3,627,500.00</b>	<b>\$3,627,500.00</b>	<b>\$43,530,000.00</b>

Finalmente, se obtiene que el total de la estimación de costos de operación para la producción de biogás equivale a \$6'759,962 mensuales y el costo de la inversión es son \$65'320,206.

Para determinar si es viable el proyecto, se debe realizar un estudio económico más detallado. Para este proyecto se hará una comparación entre la energía producida por el biogás obtenido (34,125kWh) y la energía consumida en el proceso que corresponde a 22,56kWh. Concluyendo así que el proceso está generando la energía suficiente para suplir sus requerimientos. También se debe tener en cuenta que todos los productos obtenidos del proceso pueden ser utilizados, además del biogás que puede ser utilizado para el consumo energético, el efluente que se obtiene puede separarse en dos fases (líquido y lodos), permitiendo obtener abono orgánico para su venta, lo cual corresponde a una ganancia económica del proceso.



## 6. CONCLUSIONES

- Se estimó la generación de residuos orgánicos para la PDM Siete de Agosto, mediante los datos proporcionados por el IPES, obteniendo que se generan aproximadamente 1363kg al día, equivalentes a 40.890kg al mes, lo cual equivale a cerca del 2% de la generación de residuos orgánicos de todas las plazas de mercado de Bogotá.
- Se realizaron 3 caracterizaciones de los R.O provenientes de la Plaza Distrital de Mercado Siete de Agosto, obteniendo variaciones significativas para el contenido de humedad, entre 86% y 94%, y para el contenido sólidos volátiles, entre 4% y 12% lo cual ratifica los reportes bibliográficos y permite concluir que la variación de estos parámetros alcanza aproximadamente un 8%.
- Se determinó la relación C:N para las 3 caracterizaciones de R.O, obteniendo una relación cercana a 14:1 para todas, encontrando así que esta proporción es adecuada para las condiciones óptimas del desarrollo de la digestión anaerobia por ser una buena fuente nutritiva para los microorganismos, como lo plantean varios autores.
- Mediante una revisión bibliográfica se seleccionaron las condiciones de operación para la digestión anaerobia como el contenido de sólidos totales de 8% y 12%, una relación inóculo sustrato de 3:1 basada en el contenido de sólidos volátiles de los mismos, un tiempo de retención de 30 días y temperatura mesofílica de 35°C, pues se encontró en la literatura que estos parámetros son los que favorecen la digestión anaerobia.
- Finalmente, para el montaje experimental 3 (definitivo), se evaluaron condiciones de sólidos totales de 4%, 5%, 7% y 10% y la influencia del contenido o ausencia de inóculo en la digestión. Concluyendo que los mejores resultados se obtuvieron para aquellos ensayos con mayor concentración de sólidos totales y con presencia de inóculo. Comprobando el mismo comportamiento para la investigación realizada por Alzate y Quintero en el 2016.
- Los ensayos con mejores resultados fueron aquellos con inóculo, pues se obtuvo una mayor cantidad de biogás y una mejor calidad de éste. Evidenciando así la necesidad de adicionar un inóculo que proporcione una carga microbiana al sistema y facilite el desarrollo del proceso, disminuyendo el tiempo del desarrollo de las etapas acidogénica y metanogénica como lo afirman varios autores.
- Se evaluó el contenido de sólidos totales para los montajes experimentales desarrollados a escala laboratorio, encontrando que en rangos de 7% y 10% la digestión anaerobia se favorece para el tipo de reactor trabajado (batch),

mientras que para contenidos de sólidos inferiores a 6% no se desarrolla la digestión anaerobia satisfactoriamente, ya que los microorganismos presentes en el sistema no tendrán la cantidad de nutrientes suficientes para sobrevivir en el medio de cultivo ya que éste se encuentra muy diluido. Este comportamiento también se ratificó con resultados reportados por varios autores.

- Se planteó la división del volumen del reactor único en dos reactores en paralelo unidos a uno en serie para obtener una mayor facilidad de instalación y operación de los mismos, lo cual se ratifica por medio de lo planteado por YuQian Li, et. al, concluyendo así que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo en diferentes reactores en serie y se favorecerá el proceso siempre y cuando el primer reactor sea de mayor tamaño que el segundo que se encuentra en serie.
- Se determinaron los costos de inversión de \$65'360,206, los costos de producción directos e indirectos que equivalen a \$6'759,592, en donde se encontró que los costos energéticos que requiere el proceso son suplidos por la producción de biogás esperada. Sin embargo se debe realizar un estudio que permita disminuir el consumo de energía durante el proceso y así aumentar la viabilidad económica del proyecto.

## 7. RECOMENDACIONES

- Para próximas investigaciones se recomienda realizar un muestreo de R.O durante un tiempo prolongado, de ser posible más de un mes, para así asegurar una muestra representativa que contenga toda clase de residuos orgánicos generados en la plaza de mercado Siete de Agosto. Además de ello, debe hacerse una separación en la fuente de los residuos orgánicos de la plaza de mercado con el fin de eliminar las cáscaras presentes y así garantizar un contenido de lignina bajo lo cual favorecerá la digestión anaerobia.
- Se recomienda que los investigadores cuenten con un laboratorio disponible para realizar los análisis correspondientes para cada caracterización, ya que el tiempo que demoran los laboratorios externos para entrega de resultados es de 12 días hábiles.
- Se debe realizar la caracterización de las muestras orgánicas (Residuos orgánicos de plaza de mercado y estiércol bovino) con suficiente tiempo de antelación a la instalación del montaje experimental para determinar la cantidad de material de carga y relación inóculo:sustrato con exactitud y conocer si existe un agente que pueda inhibir el proceso.
- Se sugiere analizar los microorganismos tanto de sustrato como de inóculo, su influencia en la digestión anaerobia y la susceptibilidad a cambios del medio. Además de ello, analizar DQO durante todo el proceso para determinar la cinética.
- Se sugiere aumentar el tiempo de retención del material de carga en el biodigestor con el fin de determinar el tiempo exacto en donde el sistema se estabiliza y finaliza la producción de biogás.
- Se recomienda evaluar diferentes modelos cinéticos con resultados experimentales y determinar cuál es el más adecuado que logra representar la digestión anaerobia dentro del reactor.
- Evaluar la influencia del pH durante el proceso de digestión anaerobia controlándolo con bicarbonato de calcio.
- Realizar un análisis estadístico de los resultados experimentales usando un diseño de experimentos.
- Utilizar como inóculo rumen bovino fresco puede arrojar mejores resultados debido a su alta carga microbiana.

- Se recomienda realizar un montaje experimental de digestión anaerobia donde se separe cada una de las fases, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis para tener un mayor control de cada fase y evaluar la producción y calidad del biogás.

## BIBLIOGRAFÍA

ALCÁNTARA, FLORES, et al. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DEL METANO (PBM) DE RESIDUOS DE FRUTAS Y VERDURAS EN HOGARES. Octubre, 2015.

ALZATE MONCADA, María Soledad y QUINTERO SILVA, Mabel. Caracterización de grupos tróficos durante un proceso de digestión anaerobia con lodo estiércol bovino usando un método de bajo costo. En: ION. vol. 29, no. 1.

ANTONILEZ ROMERO, Diana Marcela, BOHÓRQUEZ MACÍAS, Johanna Azucena y CORREDOR VARGAS, Aura Marcela. Bacterias Anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. En: NOVA. Bogotá D.C. 2015, vol. 13, no. 23.

ARNÁIZ, Carmen. ISAC, Laura. LEBRATO, Juman. Tratamiento biológico de aguas residuales. En: Revista Tecnología del Agua. Marzo. 2000.

BABSON M, David M. et al, Anaerobic digestion for methane generation and ammonia reforming for hydrogen production: A thermodynamic energy balance of a model system to demonstrate net energy feasibility, The Ohio State University, United States. 2013.

BERNAL VÉLEZ, Daniela y QUINTERO GARZÓN, Daniela. Desarrollo De Una Propuesta Para La Mejora De Un Modelo De Biodigestor Anaerobio Convencional a Escala Banco a Partir De Una Mezcla De Residuos Bovinos y Lodos En La Finca El Recodo De Tabio, Cundinamarca. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2016.

CAMACHO, Ricardo, VILLADA, Héctor S. y HOYOS, José I. Evaluación del Estiércol de Vaca como Inóculo en la Digestión Anaerobia Termófila de Residuos Sólidos Urbanos, Universidad del Cauca, 2017.

CAMPOS, ElenaCASTELLS, Elías y Flotats, Xavier. Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Madrid, ES: Ediciones Díaz de Santos, 2012.

CANALES GARCÍA, Marisa Celeste, RIVAS OLIVA Luis Alfredo y SORTO CRUZ, Roberto José. Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de El Salvador. San Salvador. 2010.

CARO MARTÍNEZ, Angela Lizeth. Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás a nivel de planta piloto a partir de residuos orgánicos generados en el frigorífico BLE LTDA. Bogotá D.C. 2014.

CASTILLO URIBE, Vladimir. DISEÑO Y CÁLCULO DE UN AGITADOR DE FLUIDOS. Universidad del Bio-Bio, Octubre 2013.

CENDALES LADINO, Edwin Dario. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Bogotá D.C. 2011.

CHEN, Ye, CHENG, Jay y Kurt, CREAMER. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. En: Bioresource Technology. Marzo, 2007, Vol. 99.

DEEPNRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. vol. 121.

Departamento de producción animal y pasturas. Curso de Anatomía y fisiología animal. Digestión en retículo-rumen. 2008. [En Línea] [Citado el 16 de diciembre de 2016] Disponible en: <http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos /AFA/TEORICOS/Repartido-Digestion-en-Reticulo-Rumen.pdf> Montevideo.

DEUBLEIN, Dieter y STEINHAUSER Angelika. Biogas from waste and renewable resource. Wenheim, Alemania. 2008.

DEUBLEIN, Dieter y STEINHAUSER Angelika. Biogas from waste and renewable resource, Citado por CANALES GARCÍA, Marisa Celeste, RIVAS OLIVA Luis Alfredo y SORTO CRUZ, Roberto José. Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de El Salvador. San Salvador. 2010.

Deutsche Gessellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Guía sobre el Biogás, traducido por Cooperación tecnológica en el sector energético y el Programa Gestión Ambiental Urbana e Industrial en México, 5 ed. Gülzow 2010.

DÍAS BÁEZ María consuelo, ESPITIA VARGAS Sandra Eliana, MOLINA PÉREZ Francisco. Digestión anaerobia, Citado por GARCÍA RODRÍGUEZ, Angie Mariana y GÓMEZ FRANCO, Juan Daniel. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos en Bogotá mediante digestión anaerobia. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. 2016.

DÍAZ BOHÓRQUEZ, LUISA FERNANDA y GALLEGO ESCOBAR, LAURA ALEJANDRA. Propuesta Para El Manejo y Disposición De Los Residuos Sólidos Generados En El Municipio De Muzo, Boyacá. Bogotá.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2016.

ENCICLOPEDIA FINANCIERA. Capex. [En Línea] [Citado el 2 de junio de 2017] Disponible en: <http://www.encyclopediainanciera.com/definicion-capex.html>.

EVANS, Tienda en línea oficial [En línea] [Citado el 24 de junio de 2017] Disponible en: [http://www.evans.com.mx/Especificaciones\\_evans.aspx?Articulo=188&Familia=102&Categoria=106](http://www.evans.com.mx/Especificaciones_evans.aspx?Articulo=188&Familia=102&Categoria=106).

FEDAILAINE, M., et al. Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production. En: ELSEVIER. vol. 52.

FERNANDEZ. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. Citado por DÍAZ DE BASUTO BURGOS, Aitor. Diseño, Construcción Y Puesta En Marcha De Un Biodigestor Anaerobio Con Residuos Orgánicos Generados En El Mercado De Tiquipaya (Bolivia). Bolivia. Noviembre 21. 2013.

GARCÍA RODRÍGUEZ, Angie Mariana y GÓMEZ FRANCO, Juan Daniel. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos en Bogotá mediante digestión anaerobia. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2016.

GASHAW, Alemayehu. Co-digestion of municipal organic wastes with night soil and cow dung for biogas production: A Review. En: African Journal of Biotechnology. Bule Hora. 2016, vol. 15, No. 2.

HALLENBECK, Patrick C., et al, Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, ELSEVIER, 2017.

HERNÁNDEZ, Gabriel y MORALES, Jorge. Diseño, construcción y montaje de un reactor discontinuo con reflujo citado por Ortega Valbuena, Paola Margarita y Pulido Valero, Andrea en Desarrollo De Un Montaje Por Etapas A Nivel Banco Para La Obtención De Biogás A Partir De Residuos Vegetales, Bogotá D.C: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2014.

HILKIAH IGONI, A., et al. Comparative Evaluation of Batch and Continuous Anaerobic Digesters in Biogas Production from Municipal Solid Waste using Mathematical Models. Septiembre. vol. X.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El Instituto, 1998.

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El Instituto, 2008.

\_\_\_\_\_. Referencias documentales para fuentes de información electrónica. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998.

KONDUSAMY, Dhamodharan y KALAMDHAD, Ajay S. Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production-A Review. En: ELSEVIER. vol. 2.

LEVENSPIEL, Octave. Reactores De Tanque Agitado De Tamaños Diferentes En Serie. Ingeniería De Las Reacciones Químicas. 3ra ed. México: LIMUSA WILEY, 2004.

Linde Gases Industriales. Hoja de seguridad del material (SDS) metano. [En Línea] [Citado el día 24 de mayo de 2017] Disponible en: [http://www.lindegas.ec/internet.lg.lg.ecu/es/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20METANO343\\_98262.pdf?v=1.0](http://www.lindegas.ec/internet.lg.lg.ecu/es/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20METANO343_98262.pdf?v=1.0).

LÓPEZ MARTÍNEZ, Germán. Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo. En: TECNURA. vol. 2.

LORENZO ACOSTA, Yaniris y OBAYA ABREU, M. Cristina. La Digestión anaerobia. Aspectos teóricos Parte 1. En: ICIDCA. SOBRE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR. vol. 34, no. 1.

McCABE, Warren L., Smith Julian C. OPERACIONES BÁSICAS DE INGENIERÍA QUÍMICA, Reverte, 1981.

MAO, Chunlan, et al. Review on research achievement of biogas from anaerobic digestion. En: ELSEVIER. vol. 45.

MERCK MILLIPORE. Carbón Activo. [En Línea] [Citado el día 30 de mayo de 2017.] [Citado el día 30 de mayo de 2017] Disponible en: [https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Charcoal-activated,MDA\\_CHEM-102183?Referrer-URL=https%3A%2F%2Fwww.google.com.co%2F](https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Charcoal-activated,MDA_CHEM-102183?Referrer-URL=https%3A%2F%2Fwww.google.com.co%2F).

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, Anexo C. Bogotá, D.C., 2008.

MINISTERIO DE ENERGÍAS, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011.

MOLINA TIRADO, Kevin Giovanni, et al. Determinación a escala de laboratorio la relación Sustrato/Inóculo en la biodigestión de residuos orgánicos de la Universidad EAFIT. En: ENCUESTRO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN EN INGENIERÍA ACOFI.



MUSTAFA, Mohamad Y.; CALAY, Rajnish K. y ROMÁN, E. Biogas from Organic Waste - A Case Study. En: *PROCEDIA ENGINEERING*. vol. 146.

NAVARRO ARANGO, Luis Carlos, Diseño y Construcción De Un Biodigestor Anaeróbico Para El Aprovechamiento Energético De La Biomasa y Uso Experimental Para La Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. Ocaña, 2015.

ORJUELA CASTAÑO, Gloria Carolina y VILLARRAGA VALERO, Liliana Paola. Producción De Biogás Mediante La Fermentación Anaerobia De Los Residuos Orgánicos De La Cadena De Restaurantes WOK. Bogotá.: Universidad de los Andes, 2015.

ORTEGA VALBUENA, Paola Margarita y PULIDO VALERO, Julieth Andrea. Desarrollo de un montaje por etapas a nivel banco para la obtención de biogás a partir de residuos vegetales. Bogotá D.C. 2014.

MUSA I, Tanimu. Effect of Carbon to Nitrogen Ratio of Waste on Biogas Methane Production in a Batch Mesophilic Anaerobic Digester. En: *International Journal of Innovation: Management and Technology*, vol. 5, No. 2, Abril 2014.

PARRA OROBIO, Brayan Alexis, et al. Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. En: *INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN y TECNOLOGÍA*. vol. 16.

PATRON NOCHES, Alejandro José, RODRIGUEZ BERMEJO, Alfonso Andrés. Diseño De Un Bioreactor Para La Producción De Bioetanol A Partir De Desechos Orgánicos A Escala De Laboratorio, Universidad Autónoma del Caribe. Barranquilla, Marzo, 2014.

PAVI, Suelen, et al. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. En: *BIORESOURCE TECHNOLOGY*. 10-01.vol. 228.

RAPOSO, F., et al. Influence of Inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. En: *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*. vol. 149.

RICAURTE FREIRE, Luis Eduardo. Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. Guayaquil, Ecuador, 2016.

Rotoplas. Ficha técnica Tanques de almacenamiento. [En Línea] [Citado el día 30 de junio de 2017] Disponible en: [http://archivos.distribuidornacional.com/Catalogos/2014V2/TANQUES/Ficha\\_tecnica\\_Tanques\\_para\\_Agua\\_y\\_Quimico.pdf](http://archivos.distribuidornacional.com/Catalogos/2014V2/TANQUES/Ficha_tecnica_Tanques_para_Agua_y_Quimico.pdf).

SCOTT FOGLER, H. Elementos De Ingeniería De Las Reacciones Químicas. Cuarta ed. México: PEARSON EDUCATION, 2008.

Siemens, Lista de precios Colombia, Productos eléctricos industriales Tanques para Aguas y Químicos. [En Línea] [Citado el 7 de Julio de 2017] Disponible en: <<http://www.industry.siemens.com/home/aan/es/colombia/Documents/2014/LP%20INDUSTRY%20BAJA%2030dic%202013.pdf>>.

THAMILSELVAN,D.; KANNAN,M. y LAWRENCE,P. Experimental And Theoretical Study On The Effect Of Solid Concentration On Biogas Production From Food Waste. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ENGINEERING TECHNOLOGY. vol. 7, no. 2.

TORRES LOZADA, Patricia y PÉREZ, Andrea. Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. En: EIDENAR. Cali. Diciembre de 2010, no. 9.

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE SERVICIOS PÚBLICOS. Programa para la gestión de residuos sólidos orgánicos para la ciudad de Bogotá, D.C. Bogotá D.C. 2010.

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA. Leccion 5. Digestión Anaerobia. [En línea] [Citado el: 14 de 12 de 2016.] Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin\\_5\\_digestin\\_anaerobia.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin_5_digestin_anaerobia.html).

VARGAS LEGUIZAMÓN, Carol Viviana, ZAMBRANO GARCIA, Carlos Mauricio. Estudio del efecto de tamaño de partícula de bagazo de fique en la producción de biogás. Bucaramanga, 2010.

WORLD ENERGY OUTLOOK, Resumen ejecutivo, International Energy Agency, Resumen ejecutivo, 2016.

## **ANEXOS**

## ANEXO A REACCIONES DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

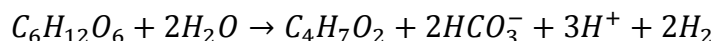
### ACIDOGÉNESIS

Las posibles reacciones bioquímicas<sup>108</sup> para esta etapa son:

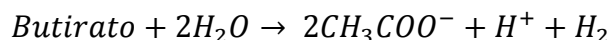
Fermentación de glucosa a acetato:



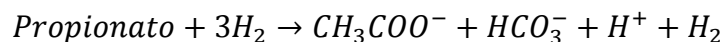
Fermentación de glucosa a butirato:



Fermentación del butirato a acetato e hidrógeno:

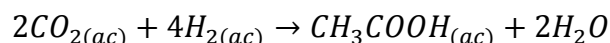


Fermentación de propionato a acetato:



### ACETOGÉNESIS

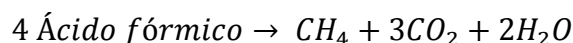
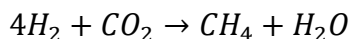
La reacción general que representa esta etapa de la digestión<sup>109</sup> es:



### METANOGENÉNESIS

Con base en lo anterior, las reacciones para el grupo de microorganismos hidrogenotróficos son<sup>110</sup>:

Reacción general:



---

<sup>108</sup> Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Lección 5. Digestión Anaerobia. [En línea] [Citado el: 14 de 12 de 2016.] Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin\\_5\\_digestin\\_anaerobia.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin_5_digestin_anaerobia.html).

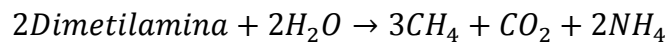
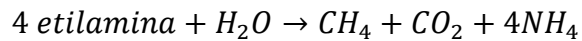
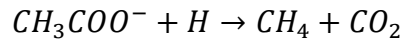
<sup>109</sup> ANTONILEZ ROMERO, Diana Marcela, BOHÓRQUEZ MACÍAS, Johanna Azucena y CORREDOR VARGAS, Aura Marcela. Bacterias Anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *En*: NOVA. Bogotá D.C. 2015, vol. 13, no. 23, p. 55-81.

<sup>110</sup> GARCÍA RODRÍGUEZ y GÓMEZ FRANCO. Op. Cit., p. 35.

Se da la reducción de  $CO_2$  para mantener baja la concentración de hidrógeno y formiato o ácido fórmico.

Para el grupo de microorganismos metilotróficos o acetoclásticos las posibles reacciones son<sup>111</sup>:

Reacción general:



El amonio producido es utilizado como fuente de nitrógeno para los microorganismos. Se debe resaltar que cuando se produce un exceso de este el proceso se verá afectado ya que puede inhibir la actividad microbiana.

---

<sup>111</sup> GARCÍA RODRÍGUEZ y GÓMEZ FRANCO. Op. Cit., p. 35.

## ANEXO B PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y METANO

**Tabla 23.** Producción de biogás y metano para cada tipo de sustrato.

Artículo/Tesis	Resumen	Resultados producción de biogás
Production of Biogas from Various Substrates under Anaerobic Conditions. Ireene I. Maile y Edison Muzenda. 2014.	Se usó estiércol de vaca y residuos de alimentos como sustrato a 32,5°C por un periodo de 14 días. El estiércol de vaca dio el mayor rendimiento esto puede atribuirse al hecho de que éste es rico en enzimas contenidas en el rúmen bovino que son importantes para la digestión anaerobia.	590mL/gSV de estiércol de vaca en un periodo de 8 a 16 días, 340mL/gSV de 10 a 16 días a partir de restos de comida.
Review on research achievement of biogas from anaerobic digestion. Chunlan Mao, Yongzhong Feng, Xiaojiao Wang y Guangxin Ren. 2015	Se recopilan los resultados de varios artículos relacionados con la producción de biogás, y se encuentran datos para reactores tipo batch utilizando como sustrato e inóculo residuos de comida y estiércol respectivamente. Se trabajó a una temperatura de 35°C por 30 días.	444mL/gSV de biogás correspondiente a 311mL/gSV de CH <sub>4</sub> .
Micro-scale anaerobic digestion of point source components of organic fraction of municipal solid waste. H.N. Chanakya, Isha Sharma, T.V. Ramachandra 2009	Se evaluó la producción de biogás a partir de residuos específicos de frutas y verduras como repollo, banano, cáscaras de cítricos y hojas frescas de bambú durante 30 días.	Se obtiene una producción de biogás de 250 a 400mL/gST para residuos de frutas y verduras.

**Tabla 23.** (Continuación).

<b>Artículo/Tesis</b>	<b>Resumen</b>	<b>Resultados producción de biogás</b>
Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. Wei Qiaoa, Xiuyi Yan, Junhui Ye, Yifei Sun, Wei Wang y Zhongzhi Zhang. 2011	Se evaluó la producción de biogás para diferentes sustratos como: estiércol bovino, porcino, residuos de frutas y verduras, residuos municipales, partiendo de la aplicación o no de un pretratamiento hidrotérmico, a una temperatura de 37°C.	Para residuos de frutas y verduras (sin pretratamiento) se obtiene una producción de 443mL/gSV de biogás y 280,9mL/gSV de CH <sub>4</sub> . Para estiércol bovino 182mL/gSV de biogás y 139,8mL/gSV de CH <sub>4</sub> .

## ANEXO C CONDICIONES DE TEMPERATURA

**Tabla 24.** Condiciones de temperatura trabajadas en artículos y tesis.

Artículo/Tesis	Resumen	T(°C)	Producción biogás/metano
Anaerobic digestion of kitchen waste to produce biogas. Salma A. Iqbal, Shahinur Rahaman, Mizanur Rahman y Abu Yousuf. 2013	Residuos de cocina con estiércol. Se observan 3 experimentos variando proporciones agregadas al digestor como carga de materia orgánica.	25-30°C y 37°C	La máxima producción fue de 50mL/gSV y 200mL/gSV de biogás para cada temperatura respectivamente.
Studies On The Utilization Of Fruit And Vegetable Waste For Generation Of Biogas. Aritra Dasa y Chanchal Mondal. 2013	Se utilizó frutas y verduras para producción de energía, evaluando diferentes concentraciones del sustrato de 3%, 4%, 5% y 6% en base seca y diferentes temperaturas.	20°C, 27°C y 37°C	0,131, 0,178, 0,335L CH <sub>4</sub> /g sustrato agregado al biodigestor para cada temperatura trabajada.
Producción de biogás mediante la fermentación anaerobia de los residuos orgánicos de la cadena de restaurantes Wok. Orejuela Castaño y Villarraga Valero. 2015	Residuos de cocina del restaurante Wok usando estiércol bovino como inóculo, variando el porcentaje de sólidos totales de la alimentación utilizando parámetros de 30%S.T (seco) y 10%S.T (húmedo) y con temperatura mesofílica y termofílica.	Mesofílico 35°C y Termofílico 55°C.	Producción de biogás y metano para: MS: 1557mL CH <sub>4</sub> /gSV 2100mL biogás/gSV. MH: 1612mL CH <sub>4</sub> /gSV 2300mL biogás/gSV. TS: 260mL CH <sub>4</sub> /gSV 600mL biogás/gSV. TH: 362mL CH <sub>4</sub> /gSV 780mL biogás/gSV.



**Tabla 24.** (Continuación).

<b>Artículo/Tesis</b>	<b>Resumen</b>	<b>T(°C)</b>	<b>Producción biogás/metano</b>
Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production-A Review. Dhamodharan Kondusamy y Ajay S. Kalamdhad. 2014	Se recopila información de diferentes artículos los cuales trabajaron a condiciones mesofílicas y termofílicas con residuos de comida y estiércol y se reporta el rendimiento de metano para cada una.	Mesofílico de 35-40°C y termofílico de 50 a 65°C.	Para condiciones mesofílicas con residuos de comida: 474mL CH <sub>4</sub> /gSV y 455mL biogás/gSV. Para condiciones termofílicas con residuos de comida: 223mL CH <sub>4</sub> /gSV y 716mL biogás/gSV.

## ANEXO D CONDICIONES DE pH

**Tabla 25.** Condiciones de pH para artículos y tesis.

Artículo/Tesis	Resumen	pH	Resultados
Producción de biogás mediante la fermentación anaerobia de los residuos orgánicos de la cadena de restaurantes WOK. Gloria Carolina Orjuela Castaño y Liliana Paola Villarraga Valero. 2015	Se utilizó una muestra de residuos de comida de restaurante WOK, se trabajó como variable de proceso la temperatura y la cantidad de sólidos totales durante 20 días.	Se afirma que el rendimiento del proceso dependerá del pH inicial de la muestra, la máxima hidrólisis y acidogénesis ocurre cuando el pH inicial es de 6.5-7.5. Monitoreado 2 veces por semana. Inicialmente el pH se encontraba entre 6 y 7.5.	Al inicio del experimento el pH se encuentra en 6-7.5, después de unos días disminuye drásticamente y se detecta el inicio de la fase acidogénica, seguido a esto el pH tiende a estabilizarse. Se concluye que la producción de biogás se ve afectada y asimismo su calidad debido a que las muestras termofílicas presentaron un pH menor durante el proceso y una producción de metano entre 600 y 780mLbiogás/gSV, mientras que para las mesofílicas que alcanzan un pH más alto después de la etapa acidogénica se produjo entre 2100 y 2300mLbiogás/gSV.
Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Germán López Martínez. 2004	Se utilizó residuos urbanos como sustrato, donde las variables de proceso fueron contenido de sólidos totales y adición o no de inóculo. Afirma que el pH óptimo para el crecimiento bacteriano se encuentra en 6.5-7.5; pH por encima de 9 y debajo de 4.5 pueden llegar a dañar las células por alteraciones en el pH interno de estas.	Desde el primer día de experimento se adiciona bicarbonato de calcio para controlar el pH por encima del ácido, es decir, se establece un pH mínimo de 6.5 para todos los experimentos realizados.	Se mide el pH cada 3 días por medio de un pHmetro digital asegurando que el pH no baje de 6.5, encontrando que las muestras sin contenido de inóculo alcanzan un pH máximo de 8-8.4 y las muestras con inóculo no superan el pH de 7.5, llegando a la conclusión que las muestras con inóculo tienen menor variación de pH durante el proceso.

**Tabla 25.** (Continuación).

<b>Artículo/Tesis</b>	<b>Resumen</b>	<b>pH</b>	<b>Resultados</b>
Desarrollo de un montaje por etapas a nivel banco para la obtención de biogás a partir de residuos vegetales. Paola Margarita Ortega Valbuena, Julieth Andrea Pulido Valero. 2014	La investigación se basó en estudiar muestras con proporciones de sustrato (residuos de frutas, verduras y hortalizas) e inóculo.	El pH óptimo está entre 6.6 y 7.2. Si se presenta un cambio de pH por debajo de 4.5 o encima de 8.3 se inicia la desnaturalización de las estructuras proteicas y se detiene el proceso, por lo tanto se adiciona hidróxido de sodio al 0.8N para estabilizar el sistema. Para el experimento el pH del sustrato es de 5.3.	La muestra con proporción equitativa de residuos e inóculo presentó valores bajos de metano, 25mL CH <sub>4</sub> /gSV, y a la vez fue el experimento que presentó una mayor disminución de pH, de 7.6 a 6.4, lo cual pudo ocasionar la reducción de la actividad bacteriana con respecto a las demás.

## ANEXO E CONDICIONES DE SÓLIDOS TOTALES

**Tabla 26.** Contenido de sólidos totales en tesis y artículos.

Artículo/Tesis	Resumen	Sólidos totales	Resultados
<p>Producción de biogás mediante la fermentación anaerobia de los residuos orgánicos de la cadena de restaurantes WOK. Gloria Carolina Orjuela Castaño y Lilia Paola Villarraga Valero. 2015</p>	<p>Se utilizó una muestra de residuos de comida del restaurante WOK que fue previamente licuada para disminuir el tamaño de partícula y homogenizar la mezcla, se trabajó como variable de proceso la temperatura y la cantidad de sólidos y totales durante 20 días.</p>	<p>Tamaño de muestra añadida fue de 112g y la 74.6g, con contenido de sólidos de 30% y 10% para la muestra seca y húmeda respectivamente.</p>	<p>Se concluyó que la temperatura óptima es 35°C y el contenido de sólidos totales no afecta la producción de biogás.</p>
<p>Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Germán López Martínez 2004</p>	<p>Se utilizó residuos urbanos como sustrato donde las variables de proceso fueron contenido de sólidos totales y adición o no de inóculo.</p>	<p>Se estudiaron 7 muestras las cuales 3 contenían inóculo y su contenido de sólidos totales fue de 20%, 35% y 50%, otras 3 muestras no contenían inóculo y presentaban los mismos contenidos de sólidos totales y por último, la muestra 7 fue analizada como un blanco.</p>	<p>Se concluyó que el contenido de sólidos no incide sobre el tiempo de retención, el factor directamente relacionado es el inóculo ya que disminuye el tiempo de retención del sistema.</p>

## ANEXO F CONDICIONES DE TIEMPO DE RETENCIÓN

**Tabla 27.** Tiempo de retención en tesis y artículos.

Artículo/Tesis	Resumen	Tiempo de retención	Resultados
Estudio Cinético de la digestión anaerobia de mezclas de desechos de fruta.	Se realizaron 40 experimentos para determinar de la cinética de reacción de utilizando diferentes cargas de materia orgánica (frutas y estiércol), tiempos de retención y temperatura completando los experimentos en un periodo de 9 meses. Se trabajó a temperaturas de 30°C, 35°C, y 40°C.	Se afirma que el tiempo de retención dependerá del tipo de sustrato, pues materiales como la celulosa que presenta un alto contenido de carbono requerirán un tiempo mayor para biodegradarse. Se trabajaron tiempos de 5 a 20 días según la variable analizada.	Se determinó que la composición de metano y CO <sub>2</sub> contenido en biogás producido para los experimentos realizados oscila entre 57%-71% y 29%-43% respectivamente. Donde la mayor parte de producción se dio bajo condiciones mesofílicas con una duración de 10 días (Se debe tener en cuenta que se hace recirculación durante el proceso). Se encontró que la producción de biogás aumenta a medida que disminuye el tiempo de retención y aumenta la carga orgánica.
Karla María Cabrera Orellana 2010	Se busca formular la mejor mezcla de residuos vegetales de utilizada como sustrato para la producción de biogás.	Se trabajó con un tiempo total de 80 días, en donde se identificó que las tres primeras etapas de la digestión fueron superadas a las 44 y 46 días para las muestras de verduras y frutas respectivamente.	Se concluyó que el mejor sustrato según los experimentos realizados corresponde a la muestra de verduras con un tiempo de retención de 50 días y un porcentaje de metano de 69,5%, teniendo en cuenta que la temperatura trabajada estuvo entre 21°C y 32°C.
Angie Mariana Garcia Rodriguez, Juan Daniel Gómez Franco. 2016			

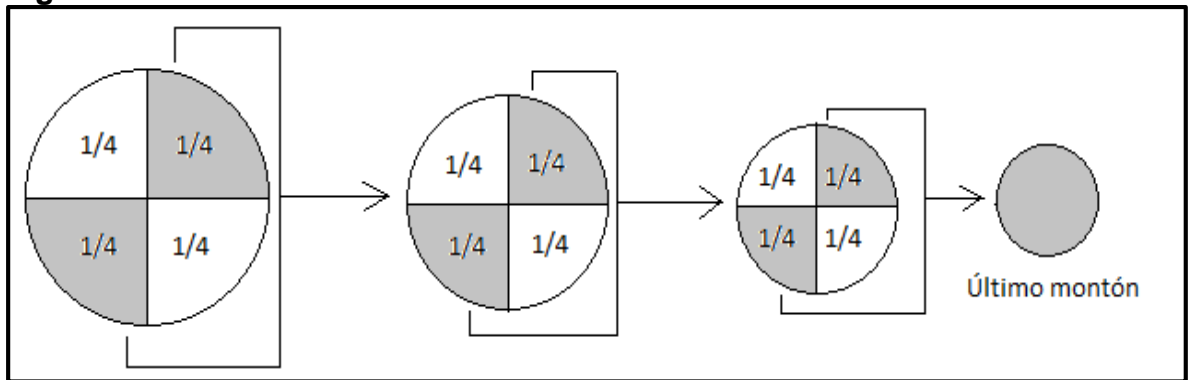
**Tabla 27.** (Continuación).

<b>Artículo/Tesis</b>	<b>Resumen</b>	<b>Tiempo de retención</b>	<b>Resultados</b>
Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Germán López Martínez 2004	Se utilizó residuos urbanos como sustrato, donde las variables de proceso fueron: contenido de sólidos y adición o no de inóculo.	Se estudiaron 7 muestras las cuales 3 contenían inóculo y su contenido de sólidos totales fueron de 20%, 35% y 50%, otras 3 muestras no contenían inóculo y presentaban mismo contenido de sólidos totales y por último un blanco. Se inicia el experimento y se desea identificar en qué momento se da la velocidad máxima de producción de biogás a partir del tiempo de retención.	Se concluyó que las muestras a las que se adicionó inóculo alcanzaron la velocidad máxima de producción de biogás entre 22 y 27 días mientras que para aquellas muestras sin inóculo se sobrepasó los 50 días.

**ANEXO G**  
**PLAN DE MUESTREO DE RESIDUOS ORGÁNICOS.**

Se realizó un muestreo aleatorio por conglomerados en la plaza de mercado Siete de Agosto, el cual consistió en seleccionar cinco canecas de residuos orgánicos aleatoriamente y realizar un método de cuarteo (figura 26 e ilustración 6).

**Figura 26.** Método de cuarteo.



**Ilustración 6.** Método de cuarteo.



## ANEXO H CARACTERIZACIÓN R.O - MUESTRA 1



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
CENTRO DE BIO-SISTEMAS**  
Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)  
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

### LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS

ORDEN DE TRABAJO No.	000125	FECHA SOLICITUD : 15-feb-17	FECHA IMPRESIÓN : 06-mar-17
<b>Cliente</b>		<b>Finca</b>	
Nombre: MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO		Nombre: PLAZA MERCADO 7 DE AGOSTO	
Dirección: CRA 57 138-12		Municipio: BOGOTÁ	
Municipio: BOGOTÁ		Departamento: BOGOTÁ D.C.	
Teléfono: 3167541690		Fax:	
E-Mail: maria.forero@estudiantes.uamerica.edu.co		Solicitante: MARIA ANGELICA FORERO CARRAZCO	
No. Muestra: 28		Material: No Especificado	
		Identificación: RESIDUOS DE PLAZA	

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	86.04			
Densidad Aparente	g <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.89			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	122.00	873.93		
Carbono Orgánico	%	5.48	39.23		
Materia Orgánica	%	11.88	85.12		
Cenizas	%		14.88		
Relación Carbono:Nitrógeno	p/p	14.53	14.53		
pH (Reacción de Acidez):	-logH <sup>+</sup>	6.30			
Conductividad Eléctrica	dS/m	25.00			
Nitrógeno Total (N):	%	0.38	2.70		4
Nitrógeno Amónico (NH <sub>4</sub> ):	%	0.023	0.163		0.23
Nitrógeno Nitrato (NO <sub>3</sub> ):	%	0.001	0.008		0.01
Fósforo (P):	%	0.05	0.35		0
Potasio (K):	%	0.21	1.50		2
Calcio (Ca):	%	0.12	0.85		1
Magnesio (Mg):	%	0.04	0.30		0
Azufre (S):	%	0.04	0.31		0
Sodio (Na):	%	0.026	0.184		0.3

**Metodología:**

*N según Kjeldahl, P por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na por absorción atómica, carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1N). pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.*

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.  
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas



## CARACTERIZACIÓN R.O - MUESTRA 2



### FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO CENTRO DE BIO-SISTEMAS

Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)  
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

#### LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS

ORDEN DE TRABAJO No.	000234	FECHA SOLICITUD : 14-mar-17	FECHA IMPRESIÓN : 03-abr-17
<b>Cliente</b>		<b>Finca</b>	
Nombre: MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO Dirección: CRA 57 138-12 Municipio: BOGOTA Teléfono: 3167541690      Fax: E-Mail: maria.forero@estudiantes.uamerica.edu.co		Nombre: PLAZA MERCADO 7 DE AGOSTO Municipio: BOGOTA Departamento: BOGOTA D.C.	
No. Muestra: 39		Solicitante: MARIA ANGELICA	Material: No Especificado
		Identificación: RESIDUOS ORGANICOS	

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	88.11			
Densidad Aparente	g*cm <sup>-3</sup>	0.97			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+ * kg <sup>-1</sup>	83.13	699.16		
Carbono Orgánico	%	4.71	39.64		
Materia Orgánica	%	10.23	86.02		
Cenizas	%		13.98		
Relación Carbono:Nitrogeno	p:p	14.68	14.68		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	4.30			
Conductividad Eléctrica	dS/m	23.60			
Nitrogeno Total (N):	%	0.32	2.70		3
Nitrogeno Amónico (NH <sub>4</sub> ):	%	0.051	0.429		0.51
Nitrogeno Nítrico (NO <sub>3</sub> ):	%	0.036	0.304		0.36
Fósforo (P):	%	0.04	0.31		0.37
Potasio (K):	%	0.13	1.10		1.31
Calcio (Ca):	%	0.10	0.81		0.96
Magnesio (Mg):	%	0.04	0.33		0.39
Azufre (S):	%	0.04	0.34		0.40
Sodio (Na):	%	0.038	0.317		0.38

**Metodología:**

*N según Kjeldahl, P por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na por absorción atómica, carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1N). pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.*

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.  
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

## CARACTERIZACIÓN R.O - MUESTRA 3



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
CENTRO DE BIO-SISTEMAS**

Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)  
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS  
ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS**

ORDEN DE TRABAJO No. 000412	FECHA SOLICITUD : 02-may-17	FECHA IMPRESIÓN : 17-may-17
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

<p><b>Cliente</b></p> <p><b>Nombre:</b> MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO  <b>Dirección:</b> CRA 57 138-12  <b>Municipio:</b> BOGOTA  <b>Teléfono:</b> 3167541690      <b>Fax:</b>  <b>E-Mail:</b> maria.forero@estudiantes.uamerica.edu.co</p>	<p><b>Finca</b></p> <p><b>Nombre:</b> PLAZA MERCADO 7 DE AGOSTO  <b>Municipio:</b> BOGOTA  <b>Departamento:</b> BOGOTA D.C.</p>
<p><b>Solicitante:</b> MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO</p>	
<p><b>Material:</b> No Especificado</p>	
<p><b>Identificación:</b> RESIDUOS ORGANICOS</p>	
<p><b>No. Muestra:</b> 53</p>	

Variable	Unidades	Base Humeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Humeda
Porcentaje de Humedad	%	<b>94.22</b>			
Densidad Aparente	g*cm <sup>-3</sup>	<b>1.00</b>			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+ * kg <sup>-1</sup>	<b>68.11</b>	1178.37		
Carbono Orgánico	%	<b>2.19</b>	37.85		
Materia Orgánica	%	<b>4.75</b>	82.13		
Cenizas	%		17.87		
Relación Carbono:Nitrógeno	p:p	<b>13.05</b>	13.05		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	<b>9.30</b>			
Conductividad Eléctrica	dS/m	<b>17.59</b>			
Nitrógeno Total (N):	%	<b>0.17</b>	2.90		2
Nitrógeno Amoniacal (NH <sub>4</sub> ):	%	<b>0.004</b>	0.065		0.04
Nitrógeno Nitrico (NO <sub>3</sub> ):	%	<b>0.004</b>	0.071		0.04
Fósforo (P):	%	<b>0.02</b>	0.37		0.21
Potasio (K):	%	<b>0.09</b>	1.60		0.92
Calcio (Ca):	%	<b>0.05</b>	0.88		0.49
Magnesio (Mg):	%	<b>0.02</b>	0.33		0.19
Azufre (S):	%	<b>0.02</b>	0.31		0.18
Sodio (Na):	%	<b>0.027</b>	0.460		0.27

**Metodología:**

*N según Kjeldahl, P por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na por absorción atómica, carbono orgánico por calcinación, N-Mineral en KCl (1N), pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.*

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.  
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

## ANEXO I ESTIMACIÓN PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE R.O DE PLAZA DE MERCADO

1. Determinación producción de biogás Plaza Siete de Agosto: Generación R.O mensual:

Se realizó un análisis dimensional a partir de la generación de R.O mensual para la plaza de mercado Siete de Agosto mostrada en la tabla 4, partiendo de la producción de biogás por gramo de sólidos volátiles (388mLbiogás/gSV) y el contenido de sólidos volátiles promedio de los R.O (8.95% SV).

$$\text{Producción biogás} \left( \frac{mL}{mes} \right) = \left( \frac{g R.O}{mes} \right) \left( \frac{g S.V}{100g R.O} \right) \left( \frac{mL biogás}{1g S.V} \right)$$

$$\text{Producción biogás} = \left( \frac{40890kg_{R.O}}{mes} \right) \left( \frac{1000g_{R.O}}{1kg_{R.O}} \right) \left( \frac{8.95g_{S.V}}{100g_{R.O}} \right) \left( \frac{388mL}{1g_{S.V}} \right) \left( \frac{1L}{1000mL} \right) \left( \frac{1m^3}{1000L} \right)$$

$$\text{Producción biogás} = 1420 \frac{m^3}{mes}$$

2. Determinación producción de biogás Plazas de mercado Bogotá:

Para hacer una estimación de la posible producción de biogás con los residuos orgánicos generados por las plazas de mercado de Bogotá, se tienen en cuenta los registros de generación de R.O de la tabla 28.

**Tabla 28.** Promedio generación de R.O de las Plazas de mercado de Bogotá.

<b>Plaza de Mercado</b>	<b>Promedio día normal (kg)</b>	<b>Promedio día mercado (kg)</b>	<b>Promedio generado mensual (kg)</b>
Siete de Agosto	802	864	22.942
La Concordia	16	25	509
Doce de Octubre	412	685	13.676
El Carmen	21	462	2.311
Fontibón	421	759	14.402
Kennedy	319	473	10.130
La Perseverancia	171	177	4.844
Las Cruces	123	774	6.501
Las Ferias	653	881	18.525
Quirigua	345	570	11.417
Carlos E. Restrepo	8.038	3.263	45.318
Samper Mendoza	305	1.287	15.159
San Benito	22	-	150
San Carlos	137	-	3.838
Santander	320	360	9.284
Trinidad Galán	345	373	9.866
Veinte de Julio	909	1.270	28.271
Corabastos	100.000	120.000	1'862.900
<b>TOTAL</b>	<b>113.359</b>	<b>132.222</b>	<b>2'080.045</b>

**Fuente:** Adaptado de Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. Programa para la gestión de los residuos sólidos orgánicos para la ciudad de Bogotá, D.C.<sup>112</sup>

$$Producción\ biogás = \left(\frac{2'080,045kg_{R.O}}{mes}\right) \left(\frac{1000g_{R.O}}{1kg_{R.O}}\right) \left(\frac{8.95\ sg_{S.V}}{100\ g_{R.O}}\right) \left(\frac{388mL}{1g_{S.V}}\right) \left(\frac{1L}{1000mL}\right) \left(\frac{1m^3}{1000L}\right)$$

$$Producción\ biogás = 72.232 \frac{m^3\ biogás}{mes}$$

<sup>112</sup> UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE SERVICIOS PÚBLICOS. Programa para la gestión de residuos sólidos orgánicos para la ciudad de Bogotá, D.C. Bogotá D.C. 2010. p. 55 -78.

## ANEXO J CARACTERIZACIÓN DEL ESTIÉRCOL BOVINO- MUESTRA 1



**FUNDACION UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
CENTRO DE BIO-SISTEMAS**  
Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)  
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS  
ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS**

ORDEN DE TRABAJO No.	000126	FECHA SOLICITUD : 15-feb-17	FECHA IMPRESIÓN : 06-mar-17
<b>Cliente</b>		<b>Finca</b>	
Nombre: MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO Dirección: CRA 57 138-12 Municipio: BOGOTA Teléfono: 3167541690      Fax: E-Mail: maria.forero@estudiantes.uamerica.edu.co		Nombre: FRIJORIFICO GUADALUPE Municipio: BOGOTA Departamento: BOGOTA D.C.	
No. Muestra: 29		Solicitante:	MARIA ANGELICA FORERO CARRAZCO
		Material:	No Especificado
		Identificación:	ESTIERCOL BOVINO

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	73.02			
Densidad Aparente	g <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	1.10			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol <sup>+</sup> * kg <sup>-1</sup>	99.32	368.12		
Carbono Orgánico	%	9.96	36.93		
Materia Orgánica	%	21.62	80.14		
Cenizas	%		19.86		
Relación Carbono:Nitrógeno	p/p	15.39	15.39		
pH (Reacción de Acidez):	-logH <sup>+</sup>	8.70			
Conductividad Eléctrica	dS/m	15.90			
Nitrógeno Total (N):	%	0.65	2.40		6
Nitrógeno Amoniacal (NH <sub>4</sub> ):	%	0.016	0.060		0.16
Nitrógeno Nitrato (NO <sub>3</sub> ):	%	0.005	0.018		0.05
Fósforo (P):	%	0.24	0.89		2
Potasio (K):	%	0.22	0.81		2
Calcio (Ca):	%	0.08	0.30		1
Magnesio (Mg):	%	0.06	0.21		1
Azufre (S):	%	0.21	0.78		2
Sodio (Na):	%	0.236	0.874		2.4

**Metodología:**

*N según Kjeldahl, P por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na por absorción atómica, carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1N). pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.*

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.  
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

## CARACTERIZACIÓN DEL ESTIÉRCOL BOVINO- MUESTRA 2



### FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO CENTRO DE BIO-SISTEMAS

Autopista Norte Km10 Via Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)  
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

#### LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS

ORDEN DE TRABAJO No.	000260	FECHA SOLICITUD : 17-mar-17	FECHA IMPRESIÓN : 03-abr-17
----------------------	--------	-----------------------------	-----------------------------

<b>Cliente</b>  Nombre: MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO Dirección: CRA 57 138-12 Municipio: BOGOTA Teléfono: 3167541690      Fax: E-Mail: maria.forero@estudiantes.uamerica.edu.co	<b>Finca</b>  Nombre: FRIJORIFICO GUADALUPE Municipio: BOGOTA Departamento: BOGOTA D.C.  Solicitante: MARIA ANGELICA FORERO Material: No Especificado Identificación: ESTIERCOL BOVINO
No. Muestra: 40	

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	79.13			
Densidad Aparente	g*cm <sup>-3</sup>	1.00			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+ * kg <sup>-1</sup>	55.42	265.55		
Carbono Orgánico	%	7.70	36.88		
Materia Orgánica	%	16.70	80.02		
Cenizas	%		19.98		
Relación Carbono:Nitrógeno	p:p	19.41	19.41		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	8.90			
Conductividad Eléctrica	dS/m	8.60			
Nitrógeno Total (N):	%	0.40	1.90		4
Nitrógeno Amoniacal (NH <sub>4</sub> ):	%	0.010	0.050		0.10
Nitrógeno Nitrico (NO <sub>3</sub> ):	%	0.003	0.016		0.03
Fósforo (P):	%	0.08	0.40		0.83
Potasio (K):	%	0.13	0.62		1.30
Calcio (Ca):	%	0.12	0.56		1.16
Magnesio (Mg):	%	0.08	0.37		0.77
Azufre (S):	%	0.08	0.39		0.82
Sodio (Na):	%	0.064	0.403		0.84

**Metodología:**

*N según Kjeldahl, P por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na por absorción atómica, carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1N), pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.*

Quím. Adriana Mireya Zamudio S.  
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

## CARACTERIZACIÓN DEL ESTIÉRCOL BOVINO- MUESTRA 3



### FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO CENTRO DE BIO-SISTEMAS

Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)  
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

#### LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS

ORDEN DE TRABAJO No.	000413	FECHA SOLICITUD : 02-may-17	FECHA IMPRESIÓN : 17-may-17
<b>Cliente</b>		<b>Finca</b>	
Nombre: MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO Dirección: CRA 57 138-12 Municipio: BOGOTA Teléfono: 3167541690      Fax: E-Mail: maria.forero@estudiantes.uamerica.edu.co		Nombre: FRUORIFICO GUADALUPE Municipio: BOGOTA Departamento: BOGOTA D.C.	
No. Muestra: 54		Solicitante: MARIA ANGELICA FORERO CARRASCO	Material: No Especificado
		Identificación: ESTIERCOL BOVINO	

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	76.18			
Densidad Aparente	g*cm <sup>-3</sup>	1.10			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+ * kg <sup>-1</sup>	52.69	221.20		
Carbono Orgánico	%	8.75	36.74		
Materia Orgánica	%	18.99	79.72		
Cenizas	%		20.28		
Relación Carbono:Nitrógeno	p/p	17.49	17.49		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	7.40			
Conductividad Eléctrica	dS/m	13.83			
Nitrógeno Total (N):	%	0.50	2.10		5
Nitrógeno Amoniacoal (NH <sub>4</sub> ):	%	0.019	0.081		0.19
Nitrógeno Nítrico (NO <sub>3</sub> ):	%	0.006	0.025		0.06
Fósforo (P):	%	0.17	0.73		1.75
Potasio (K):	%	0.26	1.10		2.62
Calcio (Ca):	%	0.15	0.63		1.51
Magnesio (Mg):	%	0.08	0.33		0.78
Azufre (S):	%	0.15	0.64		1.54
Sodio (Na):	%	0.286	1.200		2.86

**Metodología:**

*N según Kjeldahl, P por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na por absorción atómica, carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1M). pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.*

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.  
Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

## ANEXO K REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Ilustración 7. Montaje colectivo experimental.



Ilustración 8. Método volumétrico.





**Ilustración 9. Recolectores de gas.**



**Ilustración 10. Muestras de biogás.**



## ANEXO L ESTIMACIÓN MATERIAL DE CARGA AL BIODIGESTOR

Partiendo de los datos obtenidos en cada caracterización de R.O y estiércol bovino (ANEXO H y J), se determina el material de carga para cada montaje experimental a partir del siguiente modelamiento matemático.

1. Contenido de sólidos totales:

$$\%S.T = \frac{M_{R.O.S} + M_{IS}}{M_{H_2O} + M_{R.O} + M_I} \times 100$$

En donde:

$\%S.T$  → Porcentaje de sólidos totales

$M_{R.O.S}$  → Cantidad de materia seca de R.O (g)

$M_{IS}$  → Cantidad de materia seca de inóculo (g)

$M_{H_2O}$  → Cantidad de agua (g)

$M_{R.O}$  → Cantidad de R.O (g)

$M_I$  → Cantidad de inóculo (g)

Para determinar la materia seca presente en los residuos orgánicos e inóculo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$M_S = M_{Total} * ST$$

En donde:

$M_S$  → Cantidad de materia seca (g).

$M_{Total}$  → Cantidad de materia total (inóculo o R.O) (g).

$ST$  → Fracción de sólidos totales presente en la muestra.

Como se observa en la ecuación anterior, se tienen 3 incógnitas:  $M_{R.O}$ ,  $M_I$  y  $M_{H_2O}$ , por lo tanto se debe utilizar 2 ecuaciones más para solucionar el sistema de ecuaciones, las cuales serán la relación I:S basada en la cantidad de sólidos volátiles que debe ser igual a 3:1 y el total de material cargado al biodigestor.

2. Relación I:S:

$$I:S = \frac{M_I * SV_I}{M_{R.O} * SV_{R.O}}$$

En donde:

$M_I$  → Cantidad de inóculo (g)

$M_{R.O}$  → Cantidad de R.O (g)

$SV_I$  → Fracción de sólidos volátiles en Inóculo.

$SV_{R.O}$  → Fracción de sólidos volátiles en R.O.

3. Porcentaje de carga del biodigestor:

$$\% \text{ Carga biodigestor} = \frac{M_{R.O} + M_I + M_{H_2O}}{V_R} * 100$$

En donde:

$M_I$  → Cantidad de inóculo (g o mL)

$M_{R.O}$  → Cantidad de R.O (g o mL)

$M_{H_2O}$  → Cantidad de agua (g o mL)

$V_R$  → Volumen del reactor (mL)

Se asume una densidad de 1g/mL para el material orgánico (R.O e inóculo).

Solucionando el sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas se obtienen los resultados de cantidad de carga de R.O, inóculo y agua para cada montaje experimental.

Para el montaje experimental 1 se utilizó un volumen de biodigestor de 5L mientras que para el montaje experimental 2 y 3 se utilizaron biodigestores de 2L.

**Montaje experimental 1:** Se utilizó un porcentaje de biodigestor cargado variable para cada ensayo, el contenido de sólidos de 8 y 12% y la relación I:S de 3:1. Los resultados se muestran en la tabla 29.

**Tabla 29.** Carga del biodigestor, Montaje experimental 1.

Etiqueta	%ST		Inóculo (g)	R.O BS (g)	R.O BH (g)	Agua (g)	%Carga BIODI.
	esp.	real					
12CON	12	14	1200	47.52	340.43	1126.95	53
8CON	8	9	1200	47.52	340.43	2460.64	80
12SIN	12	8	1200	47.52	340.43	226.95	11
8SIN	8	6	1200	47.52	340.43	510.64	17

Para este montaje la relación I:S real fue de 6:1.

**Montaje experimental 2:** Se utilizó un porcentaje de biodigestor cargado de 50%, contenido de sólidos de 8 y 12% y relación I:S de 3:1. Los resultados se muestran en la tabla 30.

**Tabla 30.** Carga del biodigestor, Montaje experimental 2.

<b>Etiqueta</b>	<b>%ST esp.</b>	<b>%ST real</b>	<b>Inóculo (g)</b>	<b>R.O BS (g)</b>	<b>R.O BH (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
12CON	12	10	338.53	24.41	205.33	456.14
8CON	8	6	338.53	16.28	136.89	637.42
12SIN	12	10	225.69	102.21	859.60	140.40
8SIN	8	7	225.69	68.14	573.07	426.93

La relación I:S real fue de 3:1, es decir, cumplió con lo esperado.

**Montaje experimental 3:** Se utilizó un porcentaje de biodigestor cargado de 70%, contenido de sólidos de 8 y 12% y relación I:S de 3:1. Los resultados se muestran en la tabla 31.

**Tabla 31.** Carga del biodigestor, Montaje experimental 3.

<b>Etiqueta</b>	<b>%ST esp.</b>	<b>%ST real</b>	<b>Inóculo (g)</b>	<b>R.O BS (g)</b>	<b>R.O BH (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
12CON	12	10	535	39.96	309	556
8CON	8	7	357	26.64	206	837
12SIN	12	5	0	168	1300	100
8SIN	8	4	0	112	867	533

La relación I:S obtenida tras la caracterización de la muestra 3 fue de 7:1, mucho mayor a la esperada de 3:1 debido al bajo contenido de sólidos volátiles en la muestra de R.O que fue de 4.75%.

## ANEXO M RREGISTRO DE TEMPERATURA Y pH

A continuación se muestran los resultados obtenidos de pH y temperatura para todos los montajes experimentales.

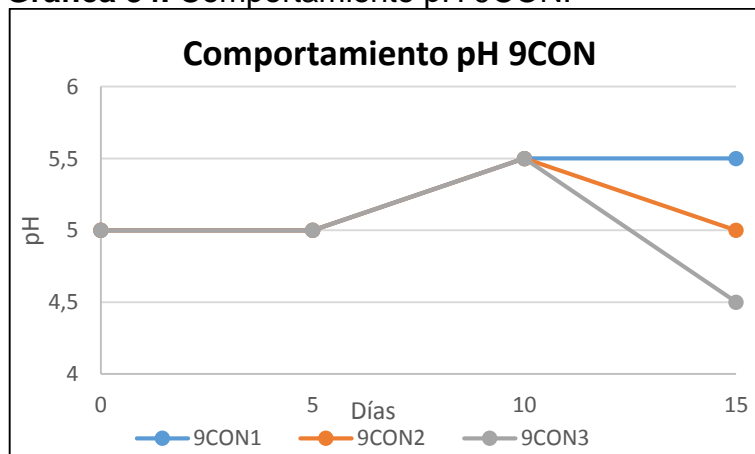
### MONTAJE EXPERIMENTAL 1:

**Tabla 32.** Registro de pH y temperatura cada 5 días.

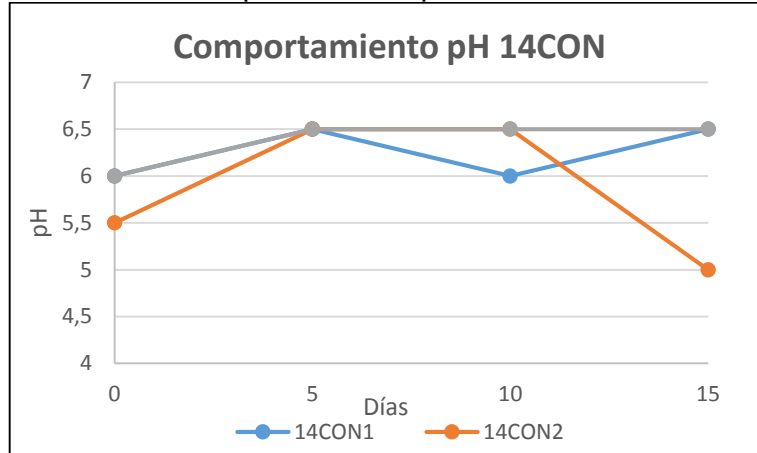
Fecha Ensayo	20/02/2017		25/02/2017		2/03/2017		7/03/2017	
	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH
9CON1	39	5	33	5	36	5.5	36	5
9CON2	36	5	34	5	38	5	37	5
9CON3	37	5	32	5	36	4.5	37	5
14CON1	36	6	32	6.5	38	6	36	6.5
14CON2	39	5.5	33	6.5	38	6.5	36	5
14CON3	38	6	34	6.5	38	6.5	36	6.5
6SIN1	33	5	39	5.5	32	5	34	5
6SIN2	34	5	39	6	31	4.5	34	4.5
6SIN3	37	4	36	5	30	4.5	34	5
8SIN1	32	6	36	6	36	5	36	5
8SIN2	34	6	38	6.5	38	4.5	38	4
8SIN3	34	5	39	6.5	37	4.5	36	4.5

En las gráficas 34 a 41 se observa el comportamiento de temperatura y pH para cada ensayo.

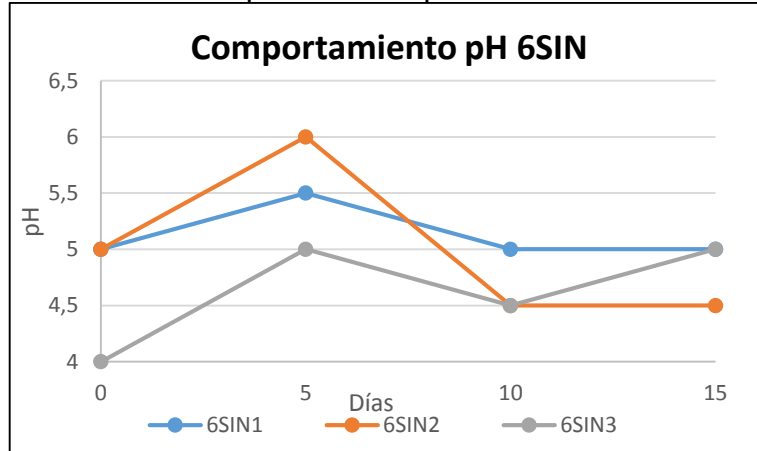
**Gráfica 34.** Comportamiento pH 9CON.



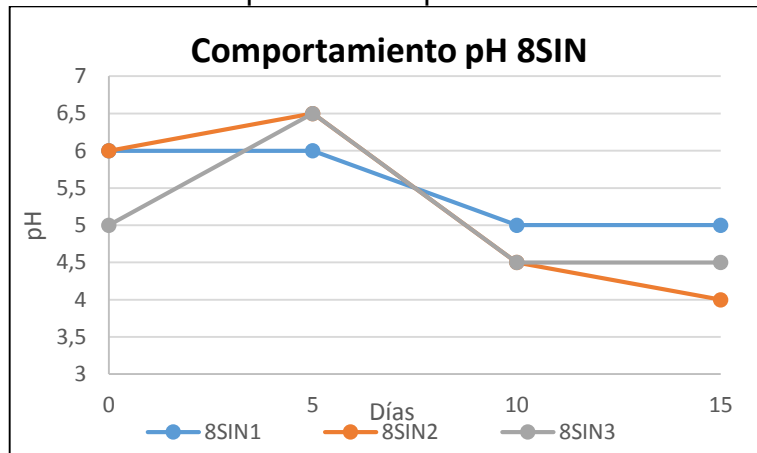
**Gráfica 35. Comportamiento pH 14CON.**



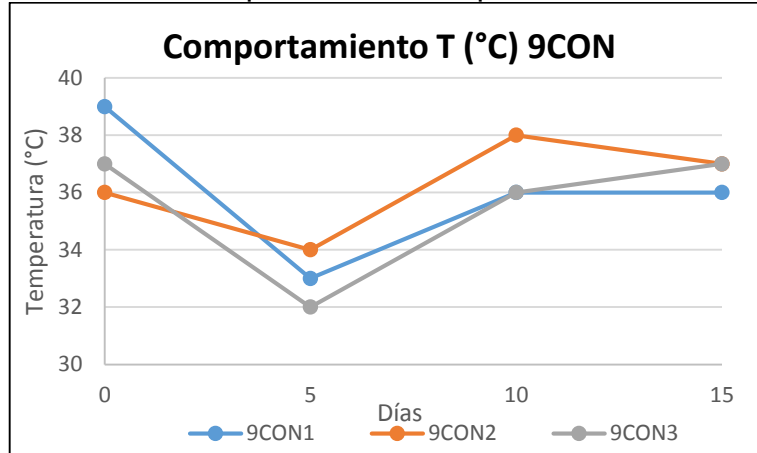
**Gráfica 36. Comportamiento pH 6SIN.**



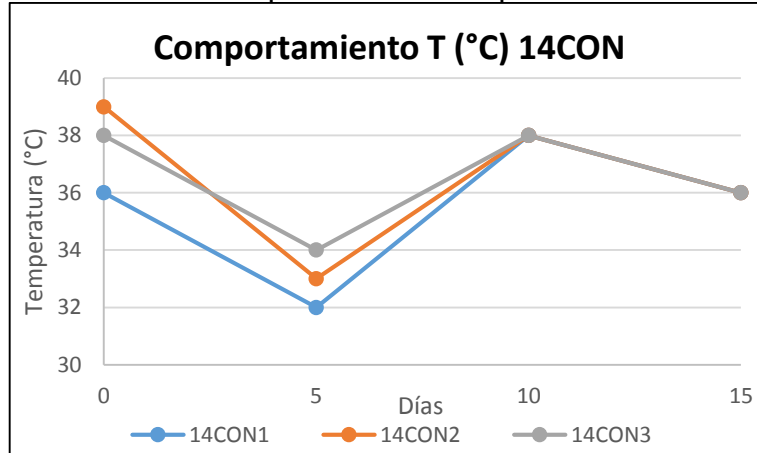
**Gráfica 37. Comportamiento pH 8SIN.**



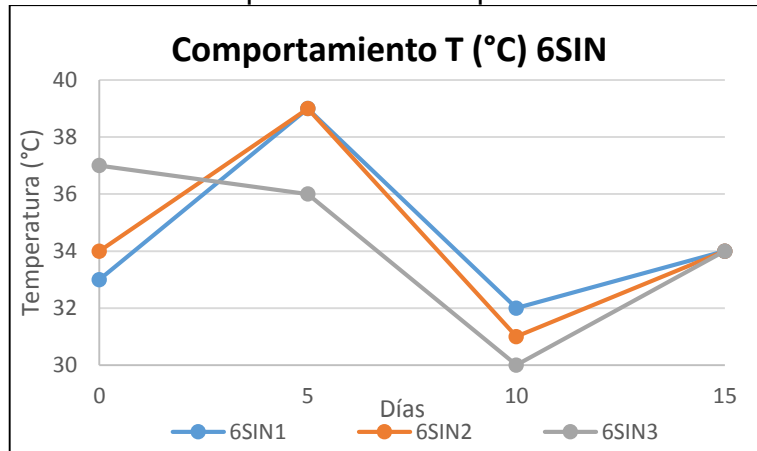
**Gráfica 38.** Comportamiento temperatura 9CON.



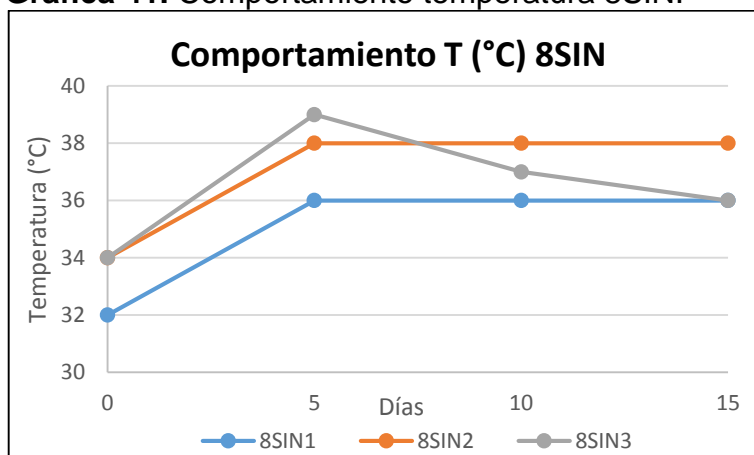
**Gráfica 39.** Comportamiento temperatura 14CON1.



**Gráfica 40.** Comportamiento temperatura 6SIN.



**Gráfica 41. Comportamiento temperatura 8SIN.**



**MONTAJE EXPERIMENTAL 2:**

**Tabla 33. Registro de pH y temperatura cada 5 días 7SIN**

FECHA	Días	7SIN1		7SIN2		7SIN3	
		pH	T( °C)	pH	T( °C)	pH	T( °C)
20/03/1017	1	5	34	5	35	5,5	36
25/03/1017	5	6	32	5,5	33	5,5	34
30/03/1017	10	6,5	35	5,5	35	6	35
4/04/17	15	6,5	34	5	34	5	35
9/04/17	20	5,5	36	5	36	5,5	34
14/04/17	25	6,5	35	6,5	35	6	36
19/04/17	30	6,5	35	5	37	6	35
3/05/17	35	0	0	5	34	0	0
8/05/17	40	0	0	6,5	34	0	0
13/05/17	45	0	0	5	39	0	0
23/05/17	50	0	0	7	37	0	0
28/05/17	55	0	0	6,5	33	0	0
2/06/17	60	0	0	4	35	0	0



**Tabla 34.** Registro de pH y temperatura cada 5 días 6CON

Fecha	Días	6CON1		6CON2		6CON3	
		pH	T( °C)	pH	T( °C)	pH	T( °C)
20/03/1017	1	5	36	5,5	32	5	38
25/03/1017	5	5	41	5	37	4	34
30/03/1017	10	5	37	5	35	5	34
4/04/17	15	5	36	4,5	37	5	35
9/04/17	20	6,5	34	4	38	4	38
14/04/17	25	6	39	6,5	38	4,5	38
19/04/17	30	6,5	37	6	36	4	40
3/05/17	35	0	0	0	0	4	37
8/05/17	40	0	0	0	0	6,5	37
13/05/17	45	0	0	0	0	4	37
23/05/17	50	0	0	0	0	5	38
28/05/17	55	0	0	0	0	5	35
2/06/17	60	0	0	0	0	4	37

**Tabla 35.** Registro de pH y temperatura cada 5 días 10CON

Fecha	Días	10CON1		10CON2		10CON3	
		pH	T( °C)	pH	T( °C)	pH	T( °C)
20/03/1017	1	4,5	36	5	36	5	36
25/03/1017	5	5	35	4	37	4	38
30/03/1017	10	5	34	5	35	4,5	34
4/04/17	15	6	35	4,5	36	4,5	38
9/04/17	20	6	38	6	36	5,5	36
14/04/17	25	4,5	37	5,5	37	4,5	36
19/04/17	30	4	38	5,5	35	5	35
3/05/17	35	4	37	0	0	0	0
8/05/17	40	4,5	37	0	0	0	0
13/05/17	45	4	38	0	0	0	0
23/05/17	50	4,5	38	0	0	0	0
28/05/17	55	7	34	0	0	0	0
2/06/17	60	5	36	0	0	0	0

**Tabla 36.** Registro de pH y temperatura cada 5 días 12SIN

Fecha	Días	12SIN1		12SIN2		12SIN3	
		pH	T( °C)	pH	T( °C)	pH	T( °C)
20/03/1017	1	4,5	39	4,5	39	5	36
25/03/1017	5	5	34	5,5	35	5	33
30/03/1017	10	5	37	5	38	5	36
4/04/17	15	5,5	35	5	36	6,5	35
9/04/17	20	5,5	36	6	39	6,5	38
14/04/17	25	5	35	4,5	36	5,5	37
19/04/17	30	5,5	35	4,5	37	5,5	35
3/05/17	35	0	0	5	33	0	0
8/05/17	40	0	0	7	31	0	0
13/05/17	45	0	0	6	37	0	0
23/05/17	50	0	0	7	34	0	0
28/05/17	55	0	0	7	33	0	0
2/06/17	60	0	0	6	34	0	0

**MONTAJE EXPERIMENTAL 3:****Tabla 37.** Registro de pH y temperatura cada 5 días 4SIN

Fecha	Ensayo t (días)	4SIN1		4SIN2	
		Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)	pH
3/05/2017	1	39	5.5	37	5
8/05/2017	5	38	5.5	36	5
13/05/2017	10	37	6	36	6.5
18/05/2017	15	36	5.5	36	5.5
23/05/2017	20	37	5	37	5
28/05/2017	25	34	5.5	34	4
2/06/2017	30	36	5.5	37	5

**Tabla 38.** Registro de pH y temperatura cada 5 días 7CON

Ensayo		7CON1		7CON2	
Fecha	t (días)	Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)	pH
3/05/2017	1	39	5	37	5
8/05/2017	5	36	5.5	33	6
13/05/2017	10	36	4.5	34	4
18/05/2017	15	36	6	35	6.5
23/05/2017	20	37	4.5	35	5
28/05/2017	25	33	5	33	5
2/06/2017	30	35	5.5	35	7

**Tabla 39.** Registro de pH y temperatura cada 5 días 5SIN

Ensayo		5SIN1		5SIN2	
Fecha	t (días)	Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)	pH
3/05/2017	1	37	4.5	37	5
8/05/2017	5	36	4	36	5
13/05/2017	10	37	4.5	36	6.5
18/05/2017	15	37	5	37	6
23/05/2017	20	35	4	35	5
28/05/2017	25	33	4	33	5
2/06/2017	30	35	5.5	35	5.5

**Tabla 40.** Registro de pH y temperatura cada 5 días 10CON

Ensayo		10CON1		10CONN2	
Fecha	t (días)	Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)	pH
3/05/2017	1	37	4.5	40	5
8/05/2017	5	37	4.5	37	5.5
13/05/2017	10	37	4.5	36	4
18/05/2017	15	36	6	39	5
23/05/2017	20	36	5	37	3.5
28/05/2017	25	34	5	35	5
2/06/2017	30	36	5	36	5

## ANEXO N REGISTRO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

**Tabla 41.** Registro producción de biogás para todos los ensayos, Montaje experimental 2 (Marzo 20-Abril 18).

día	7SIN1	7SIN2	7SIN3	6CON1	6CON1	6CON3	10CON1	10CON2	10CON3	10SIN1	10SIN2	10SIN3
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	4,2	20	105	0	74	295	150	0	75	70	75	11
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	600	350	0	0	0	0	0	0	0	655	510
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	375	265	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	250	197	0	0	0	0	0	0	205	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	983	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	312	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	345	415
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	320	200
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	205	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 42.** Registro producción de biogás para todos los ensayos, Montaje experimental 3 (Mayo 3-Junio 2).

<b>Producción de biogás (mL)</b>								
t (días)	4SIN1	4SIN2	7CON1	7CON2	5SIN1	5SIN2	10CON1	10CON2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	110	1	0	0	0	0	100	780
2	75	2	110	165	0	0	755	500
3	0	3	0	0	0	0	0	0
4	0	4	0	0	0	0	20	50
5	90	5	35	0	0	0	0	130
6	0	6	0	0	0	0	0	0
7	0	7	0	0	0	0	0	0
8	0	8	0	0	0	0	0	0
9	0	9	0	0	0	0	0	0
10	0	10	0	0	0	0	0	0
11	0	11	0	0	285	0	0	0
12	0	12	0	0	0	0	0	0
13	0	13	0	0	0	0	0	0
14	0	14	0	45	0	0	0	4
15	0	15	0	0	0	0	0	0
16	45	16	0	45	63	63	0	0
17	5	17	0	0	15	15	0	10
18	0	18	55	0	0	10	0	0
19	0	19	0	0	2	105	0	0
20	0	20	0	60	75	0	0	0
21	0	21	0	0	0	0	0	0
22	0	22	0	10	0	0	0	0
23	0	23	0	30	0	0	0	0
24	0	24	0	30	0	0	0	0
25	0	25	0	30	4	0	0	0
26	0	26	0	0	0	0	0	0
27	0	27	0	0	0	100	0	0
28	0	28	0	0	0	0	0	0
29	0	29	0	0	0	0	0	0
30	0	30	0	0	0	0	0	0

## ANEXO O RESULTADOS CROMATOGRAFÍA DE GASES

Laboratorio de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Sede Bogotá



**INFORME DE ENSAYO**  
Código: FA006001 Versión: 01  
Vigencia: 16/07/2012 Página 1 de 2

**Consecutivo No. 039 – 2017**  
**Fecha 2017-06-12**

<b>Nombre</b>	María Angélica Forero Carrasco		
<b>Dirección</b>	Carrera 57 No. 138 - 12	<b>Teléfono</b>	4891124
<b>Correo electrónico</b>	Maria.forero@estudiantes.uamerica.edu.co		

<b>Ensayo</b>	Cromatografía Líquida/gas
<b>Orden de trabajo</b>	LQUI-039-2017

Muestra	
<b>Consecutivo</b>	LQUI-039-2017
<b>Fecha de recepción</b>	5-06-2017
<b>Cantidad</b>	4 muestras

Ejecución del ensayo	
<b>Fecha inicio</b>	05-06-2017
<b>Fecha fin</b>	12-06-2017

### 1. MÉTODO DE ENSAYO

<b>Preparación de las muestras</b>	Ninguna
<b>Normas o especificación aplicable</b>	Ninguna
<b>Desviación adiciones ó exclusiones de la norma o especificación</b>	Ninguna

### 2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra No.	Descripción	Observaciones iniciales
039A	Muestra 1 8 CON 05/06/17	Ninguna
039 B	Muestra 2 8 SIN 05/06/17	Ninguna
039 C	Muestra 3 12 SIN 05/06/17	Ninguna
039 D	Muestra 4 12 CON 05/06/17	Ninguna

**NOTA:** Los resultados presentados a continuación corresponden a las muestras entregadas al laboratorio por el cliente.

### 3. DATOS DEL ENSAYO

<b>Equipo</b>	Cromatógrafo Hp 5890
<b>Detector</b>	TCD. Temperatura 150 °C
<b>Inyector</b>	Temperatura 100°C
<b>Columna</b>	Malla molecular 13x
<b>Tamaño de Muestra</b>	0,1 ml

**INFORME DE ENSAYO**  
Código: FA008001 Versión: 01  
Vigencia: 16/07/2012 Página 2 de 2

Consecutivo No. 039 – 2017  
Fecha 2017-06-12

#### 4. RESULTADOS

	%vol. Metano			Promedio
LIQ039 M1	4,3	3,8	3,2	3,8
LIQ039 M2	n.d	n.d	n.d	n.d
LIQ039 M3	n.d	n.d	n.d	n.d
LIQ039 M4	0,4	0,6	0,5	0,5

n.d No detectado, por debajo del límite de detección (<0,2% v/v)

*ORIGINAL FIRMADO*

Ing. JORGE ORLANDO MANRIQUE PERDOMO  
Coordinador LIQ

**ANEXO P**  
**PARÁMETROS CINÉTICOS TEÓRICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

En la tabla 43 se muestran los parámetros cinéticos reportados por DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S.

**Tabla 43.** Parámetros cinéticos del modelo Gompertz.

T (°C)	30	40	50	60
P <sub>máx</sub> (mL)	5638.6	6463.3	7583.2	7062.3
R <sub>b</sub> (mL/día)	432.4	504.6	581.8	537
(día)	1.5	1.9	2.4	2.0

**Fuente:** DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. vol. 121, p. 100-104.

En la tabla 44 se muestra la composición del biogás obtenido para cada temperatura trabajada.

**Tabla 44.** Composición del biogás.

Temperatura (°C)	Composición del biogás (%)	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
30	60,8	36,3
40	60,5	38,0
50	61,2	37,1
60	59,1	38,5

**Fuente:** Adaptado de DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. vol. 121, p. 100-104.

A partir del registro de producción acumulada de biogás y los resultados de la caracterización de éste, se determina la producción diaria de biogás, las moles de CH<sub>4</sub>, la velocidad de reacción y la conversión en términos de la relación de moles de CH<sub>4</sub> producidas y moles de Carbono alimentadas al reactor. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para determinar los parámetros mencionados anteriormente.

Producción de biogás diaria:

$$V_{biogas} = \frac{V_{Biogas\ acum(t)}(mL) - V_{Biogas\ acum(t-1)}(mL)}{1\ (día)}$$



Volumen de metano diario:

$$V_{CH_4} = X_{CH_4} V_{Biogas} \left( \frac{mL}{día} \right)$$

Moles de CH<sub>4</sub> producidas diariamente:

$$\frac{mol_{CH_4}}{día} = V_{CH_4} \left( \frac{mL}{día} \right) \left( \frac{0,000656g}{1mL} \right) \left( \frac{1mol}{16,04g} \right)$$

Velocidad de reacción:

$$r = \left( \frac{mol_{CH_4}}{día} \right) \left( \frac{1}{V_{Reactor}(mL)} \right)$$

Conversión de C en metano:

$$X = \frac{mol_{CH_4}}{mol C_{entrada}}$$

En la tabla 45 se muestran los resultados obtenidos para cada día durante el tiempo de retención de 30 días.

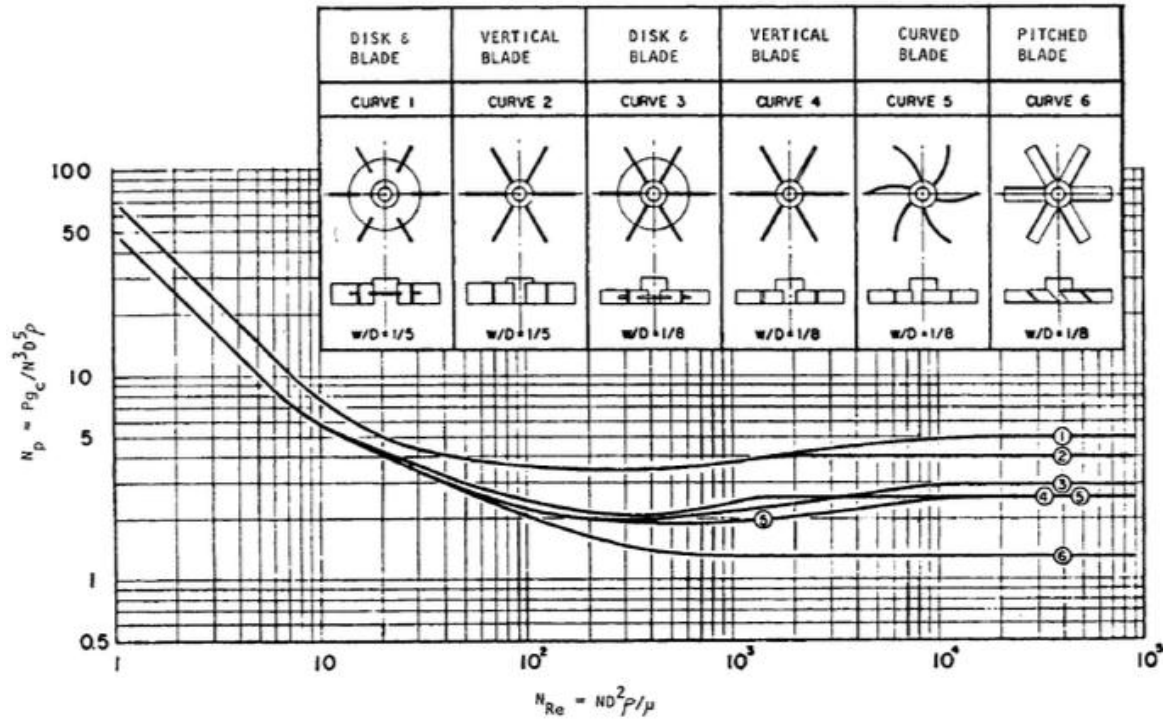
**Tabla 45.** Parámetros a partir resultados reportados por DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S.

t (día)	VBiogas acum. (mL)	VBiogas (mLBiogas/ día)	CH <sub>4</sub> (mL/día)	mol CH <sub>4</sub> /día	r (molCH <sub>4</sub> / mLdía)	1/r	X
1	259.4	259.36	157.30	6.221.E-03	3.1.E-06	321468.9	1.25.E-03
2	471.5	212.19	128.69	5.090.E-03	2.5.E-06	392937.4	1.02.E-03
3	765.4	293.82	178.20	7.048.E-03	3.5.E-06	283761.5	1.41.E-03
4	1133.2	367.80	223.07	8.823.E-03	4.4.E-06	226686.1	1.77.E-03
5	1557.3	424.14	257.24	1.017.E-02	5.1.E-06	196576.6	2.04.E-03
6	2014.9	457.57	277.51	1.098.E-02	5.5.E-06	182216.1	2.20.E-03
7	2482.5	467.62	283.61	1.122.E-02	5.6.E-06	178297.9	2.25.E-03
8	2939.9	457.36	277.39	1.097.E-02	5.5.E-06	182298.0	2.20.E-03
9	3371.5	431.66	261.80	1.035.E-02	5.2.E-06	193150.1	2.07.E-03
10	3767.3	395.80	240.05	9.494.E-03	4.7.E-06	210650.4	1.90.E-03
11	4121.8	354.51	215.01	8.504.E-03	4.3.E-06	235185.4	1.70.E-03
12	4433.4	311.55	188.95	7.473.E-03	3.7.E-06	267616.8	1.50.E-03
13	4703.0	269.61	163.52	6.467.E-03	3.2.E-06	309249.1	1.30.E-03
14	4933.4	230.42	139.75	5.527.E-03	2.8.E-06	361849.8	1.11.E-03
15	5128.3	194.94	118.23	4.676.E-03	2.3.E-06	427705.6	9.37.E-04
16	5291.9	163.57	99.21	3.924.E-03	2.0.E-06	509712.3	7.86.E-04
17	5428.3	136.35	82.69	3.271.E-03	1.6.E-06	611495.3	6.55.E-04
18	5541.3	113.04	68.56	2.712.E-03	1.4.E-06	737567.1	5.43.E-04
19	5634.6	93.31	56.59	2.238.E-03	1.1.E-06	893524.3	4.48.E-04
20	5711.4	76.75	46.55	1.841.E-03	9.2.E-07	1086295.5	3.69.E-04
21	5774.3	62.95	38.18	1.510.E-03	7.6.E-07	1324447.6	3.03.E-04
22	5825.8	51.51	31.24	1.236.E-03	6.2.E-07	1618566.5	2.48.E-04
23	5867.9	42.07	25.52	1.009.E-03	5.0.E-07	1981727.2	2.02.E-04
24	5902.2	34.31	20.81	8.230.E-04	4.1.E-07	2430074.6	1.65.E-04
25	5930.2	27.95	16.95	6.703.E-04	3.4.E-07	2983541.3	1.34.E-04
26	5952.9	22.74	13.79	5.454.E-04	2.7.E-07	3666733.8	1.09.E-04
27	5971.4	18.49	11.21	4.435.E-04	2.2.E-07	4510026.1	8.88.E-05
28	5986.4	15.02	9.11	3.603.E-04	1.8.E-07	5550910.3	7.22.E-05
29	5998.6	12.20	7.40	2.926.E-04	1.5.E-07	6835663.4	5.86.E-05
30	6008.5	9.90	6.00	2.375.E-04	1.2.E-07	8421404.7	4.76.E-05


Las moles totales de CH<sub>4</sub> producidas durante 30 días son 0,149 obteniendo así una conversión global del proceso de 2,99%.

## ANEXO Q NÚMERO DE POTENCIA FRENTE A NÚMERO DE REYNOLDS PARA TURBINAS DE SEIS PALAS

**Gráfica 42.** Número de potencia frente a número de Reynolds.



**Fuente:** Chemical Process Equipment: Selection and Design. Newton, MA: Butterworth-Heinemann. Walas, S. M. 1990

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2017


## AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotros **María Angélica Forero Carrasco** y **Andrea Catalina Sánchez Quevedo** en calidad de titulares de la obra **Desarrollo de la ingeniería conceptual del proceso de producción de biogás mediante los residuos orgánicos provenientes de la plaza distrital de mercado Siete de Agosto**, elaborada en el año 2016, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2017

	<b>Atribución- no comercial- sin derivar:</b> permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	<b>Atribución – no comercial:</b> permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	<b>Atribución – no comercial – compartir igual:</b> permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: [http://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](http://co.creativecommons.org/?page_id=13)

**Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.**

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	
<b>Información Confidencial:</b> este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 28 días del mes de julio del año 2017.

#### LOS AUTORES:

##### Autor 1

**Nombres**  
María Angélica  
**Documento de identificación No**  
1.019.087.428

**Apellidos**  
Forero Carrasco  
**Firma**



##### Autor 2

**Nombres**  
Andrea Catalina  
**Documento de identificación No**  
1.015.448.886

**Apellidos**  
Sánchez Quevedo  
**Firma**

