



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA
PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS
INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y
MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA**

Paulina María Castillo Montenegro

Asesorado por el Msc. Ing. Marco Tulio Romero Cortez

Guatemala, marzo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA
PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS
INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y
MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PAULINA MARÍA CASTILLO MONTENEGRO
ASESORADO POR EL MSC. ING. MARCO TULIO ROMERO CORTEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MARZO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

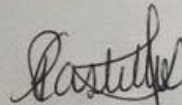
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 26 de febrero de 2017.



Paulina María Castillo Montenegro

Guatemala 26 de septiembre del 2017

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química
Ing. Carlos Salvador Wong Daví
Director de Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Wong:

Le envío un cordial saludo deseándole éxitos en sus actividades cotidianas. El motivo de la presente es para notificarle que, yo Marco Tulio Romero Cortez, quien figuro como asesor de la estudiante Paulina María Castillo Montenegro de la carrera de INGENIERÍA QUÍMICA con CUI No. 2308404770114 y registro académico 201212497, he leído y revisado el informe final titulado "Propuesta de la implementación de un biodigestor tipo geomembrana PVC mediante la evaluación de un reactor piloto anaerobio para la producción de biogás a partir de estiércol vacuno, residuos de cocinas industriales y aguas residuales provenientes de sanitarios y mingitorios en Ingenio Santa Ana.", el cual queda APROBADO, por lo tanto, la estudiante puede presentarlo para la revisión que ahora corresponda.

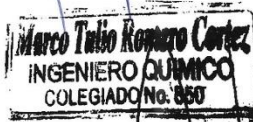
Atentamente

(f)



Ing. Qco. Marco Tulio Romero Cortez

Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 19 de octubre de 2017.
Ref.EPS.DOC.739.10.17.

Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Inga. Classon de Pinto:


Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Paulina María Castillo Montenegro** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **201212497**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA"**.

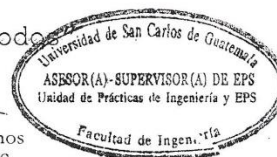
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Sergio Alejandro Recinos
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
SAR/ra

Edificio de EPS, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, zona 12.
Teléfono directo: 2442-3509

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 19 de octubre de 2017.
Ref.EPS.D.424.10.17.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente


Estimado Ingeniero Wong Davi.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria Paulina María Castillo Montenegro, quien fue debidamente asesorada y supervisada por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS



CdRcdP/ra



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-TG-008

Guatemala, 17 de noviembre de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.049.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **042-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Ejercicio Profesional Supervisado-

Solicitado por la estudiante universitaria: **Paulina María Castillo Montenegro**.
Identificada con número de carné: **2012-12497**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Marco Tulio Romero Cortéz**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Hilda Piedad Palma Ramos de Martini
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.006.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **PAULINA MARÍA CASTILLO MONTENEGRO** titulado: **"PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA."** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero 2018

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/kdlq



Formando Ingenieros Quimicos en Guatemala desde 1939

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG.087.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA PVC MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE UN REACTOR PILOTO ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL VACUNO, RESIDUOS DE COCINAS INDUSTRIALES Y AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE SANITARIOS Y MINGITORIOS EN INGENIO SANTA ANA**, presentado por la estudiante universitaria: **Paulina María Castillo Montenegro**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, marzo de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser una importante guía en mi vida y en mi carrera al darme la sabiduría para alcanzar este éxito
Mi madre	Jeaneth Montenegro, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida
Mi hermana	Sofía Isabel Castillo Montenegro, por ser un ejemplo en mi vida para alcanzar lo mejor y estar siempre a mi lado.
Mi novio	Jorge Juárez, por su amor y apoyo en todo momento.
Mis amigos	Por su amistad, ser influencia positiva en mi vida y por los momentos buenos que pasamos juntos.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme vida, sabiduría, perseverancia y permitirme alcanzar las metas que me he propuesto a lo largo de mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios al abrirme las puertas y ser parte de mi crecimiento intelectual.
Facultad de Ingeniería	Especialmente a la Escuela de Ingeniería Química, por el conocimiento adquirido a lo largo de la carrera.
Mi familia	Por su apoyo y amor incondicional a lo largo de mi vida.
Ing. Marco Tulio Romero Cortez	Por ser mi asesor de investigación y brindarme su conocimiento para llevar a cabo la elaboración del mismo.
Mis amigos de la facultad	Por el apoyo brindado a lo largo de la carrera y por estar presente en los logros y fracasos conmigo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	5
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	7
4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
5. MARCO TEÓRICO.....	11
5.1. Digestión anaeróbica.....	11
5.1.1. Fase de hidrólisis.....	11
5.1.2. Fase de acidificación (acidogénesis).....	12
5.1.3. Fase acetogénica.....	13
5.1.4. Fase metanogénica.....	13
5.2. Microbiología y bioquímica de la digestión anaeróbica.....	14
5.2.1. Bacterias hidrolíticas – fermentativas (grupo I).....	16
5.2.2. Bacterias acetogénicas (grupo II).....	16

5.2.3.	Bacterias metanogénicas (grupo III)	17
5.3.	Factores determinantes en el proceso metanogénico (producción de biogás)	17
5.3.1.	Naturaleza y composición bioquímica de materias primas	18
5.3.2.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	20
5.3.3.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	21
5.3.4.	Ácidos grasos volátiles	22
5.3.5.	Alcalinidad	22
5.3.6.	Carbono orgánico total	23
5.3.7.	Coliformes fecales	23
5.3.8.	Nitratos y nitritos.....	23
5.3.9.	Relación carbono/nitrógeno de las materias primas	24
5.3.10.	Niveles de sólidos totales y volátiles.....	26
5.3.11.	Temperatura.....	27
5.3.12.	Tiempo de retención hidráulico (TRH)	29
5.3.13.	Velocidad de carga orgánica	30
5.3.14.	Potencial de hidrógeno (pH)	30
5.3.15.	Promotores e inhibidores de la fermentación	33
5.3.16.	Agitación – mezclado	34
5.4.	Biodigestor	35
5.4.1.	Tipos de biodigestores	37
5.4.1.1.	Pozos sépticos	38
5.4.1.2.	Biodigestor de domo fijo (modelo chino).....	38
5.4.1.3.	Modelo indiano	40
5.4.1.4.	Biodigestor tipo Taiwán, tubular o salchicha	41

5.4.2.	Implementación de un biodigestor	43
5.4.2.1.	Costo de diseño	43
5.4.3.	Usos del biodigestor	44
5.5.	Biogás	44
5.5.1.	Usos del biogás	45
5.5.2.	Contribución del biogás en el calentamiento global	47
5.6.	Fertilizantes naturales	48
5.6.1.	Biosol	48
5.6.2.	Foliar	49
5.7.	Recomendaciones para el sistema de biodigestión	50
5.7.1.	Limpieza	50
5.7.1.1.	Líneas de conducción	51
5.8.	Mantenimiento	52
5.8.1.	Plan básico de mantenimiento	52
5.8.2.	Control de corrosión del gasómetro	53
5.8.3.	Limpieza del residuo del proceso	53
5.9.	Riesgos en la operación	53
5.9.1.	Emisiones al aire	54
5.9.2.	Emisiones al suelo y cuerpos receptores de agua ..	54
6.	DISEÑO METODOLÓGICO	55
6.1.	Variables	55
6.1.1.	Variable independiente	55
6.1.2.	Variable dependiente	56
6.1.3.	Variable respuesta	58
6.2.	Delimitación del campo de estudio	59
6.3.	Recursos humanos disponibles	60
6.4.	Recursos materiales disponibles	61

6.4.1.	Equipo	61
6.4.2.	Cristalería	62
6.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	62
6.6.	Recolección y ordenamiento de la información	62
6.6.1.	Investigación preliminar	63
6.6.2.	Diseño de investigación	63
6.6.3.	Fase experimental	64
6.6.3.1.	Muestreo de estiércol vacuno y aguas residuales de baños y mingitorios	64
6.6.3.2.	Muestreo, acondicionamiento y preparación de la fracción orgánica ...	64
6.6.3.3.	Diagrama de flujo del procedimiento de producción de biogás	66
6.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información ..	68
6.7.1.	Procesamiento de la información en la determinación de parámetros operacionales	72
6.7.1.1.	Cálculo del volumen de biodigestor	72
6.7.1.2.	Balances de masa	73
6.7.1.3.	Relación carbono/nitrógeno (C/N)	75
6.7.1.4.	pH	76
6.7.1.5.	Temperatura biodigestor	76
6.7.1.6.	Sólidos totales	76
6.7.1.7.	Sólidos volátiles	77
6.7.1.8.	Ácidos grasos volátiles / alcalinidad	77
6.7.1.9.	Determinación de material mineral o ceniza	78
6.7.1.10.	Volumen experimental de gas metano	78

	6.7.1.10.1.	Cálculo de presión y temperatura reducida	79
	6.7.1.10.2.	Factor acéntrico	79
	6.7.1.10.3.	Coeficientes viriales	79
	6.7.1.10.4.	Factor de compresibilidad	80
	6.7.1.10.5.	Volumen molar	80
	6.7.1.11.	Producción teórica de gas metano	81
	6.7.1.12.	Eficiencia de biodigestor	81
	6.7.1.13.	Capacidad calorífica del metano	82
	6.7.1.14.	Entalpía.....	83
	6.7.1.15.	Balance de energía	84
	6.7.1.16.	Transferencia de calor por radiación	85
6.8.	Análisis estadístico		87
	6.8.1.	Comprobación de hipótesis mediante t de student para n = 10	88
	6.8.2.	Comprobación de hipótesis mediante t de student n = 6	89
	6.8.3.	Comprobación de hipótesis mediante t de student n = 4	90
	6.8.4.	Comprobación de hipótesis mediante estadístico z para n = 30.....	90
7.	RESULTADOS.....		95
8.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		105
9.	PRESUPUESTO		113

9.1.	Presupuesto de materiales para instalación de biodigestor tipo geomembrana PVC	113
9.1.1.	Presupuesto de costo de mano de obra	114
CONCLUSIONES		115
RECOMENDACIONES		117
BIBLIOGRAFÍA		119
APÉNDICES		123
ANEXOS		129

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Etapas de la fermentación anaeróbica	14
2.	Mapa conceptual de reacciones bioquímicas para la producción de metano (CH ₄)	16
3.	Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesófilicos y termófilicos	28
4.	Dependencia del pH de la actividad metanogénica	31
5.	Esquema básico de un biodigestor	36
6.	Biodigestor tipo chino	39
7.	Biodigestor tipo indiano	40
8.	Biodigestor tipo Taiwán	42
9.	Usos del biogás	46
10.	Ubicación de Ingenio Santa Ana	60
11.	Producción de biogás.....	66
12.	Diagrama de balance de masas.....	74
13.	Reservorio	81
14.	Ácidos grasos volátiles.....	95
15.	Alcalinidad	95
16.	Carbono orgánico total.....	96
17.	Ceniza.....	96
18.	Coliformes fecales	97
19.	Demanda bioquímica de oxígeno.....	97
20.	Demanda química de oxígeno	98
21.	Fósforo.....	98

22.	Nitrógeno.....	99
23.	Potasio.	99
24.	Potencial de hidrógeno	100
25.	Relación carbono/nitrógeno	100
26.	Sólidos totales	101
27.	Sólidos volátiles.....	101
28.	Temperatura ambiental.....	102
29.	Temperatura biodigestor.....	102
30.	Volumen gas metano.....	103
31.	Evaluación de producción de metano lote 1	103
32.	Evaluación de producción de biogás lote 2.....	104

TABLAS

I.	Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de la materia orgánica.....	15
II.	Residuos orgánicos de diversos orígenes	18
III.	Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal y vegetal.....	19
IV.	Disminución de la contaminación medida indirectamente a través de DQO.....	21
V.	Relación carbono/nitrógeno de las materias primas empleadas	25
VI.	Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos.....	26
VII.	Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica	28
VIII.	Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones	29
IX.	Concentración inhibidora de inhibidores comunes.....	34
X.	Composición biogás	45
XI.	Variables independientes del proceso	55

XII.	Variables dependientes del proceso	56
XIII.	Variables dependientes del proceso	57
XIV.	Variables respuesta del proceso	58
XV.	Variables respuesta del proceso	59
XVI.	Equipo utilizado para la toma de muestras y análisis en laboratorio.	61
XVII.	Cristalería utilizada en laboratorio	62
XXVIII.	Propiedades fisicoquímicas de aguas residuales de biodigestor	68
XIX.	Propiedades químicas de aguas residuales de biodigestor	69
XX.	Propiedades químicas de aguas residuales de biodigestor	70
XXI.	Propiedades químicas de aguas residuales de biodigestor	71
XXII.	Propiedades microbiológicas de aguas residuales de biodigestor....	71
XXIII.	Diferencia de medias de muestras emparejadas para estadístico t..	87
XXIV.	Diferencia de medias de muestras emparejadas para estadístico Z.	88
XXV.	Comprobación de hipótesis t de student para n = 10	91
XXVI.	Comprobación de hipótesis t de student para n = 4	92
XXVII.	Comprobación de hipótesis t de student para n = 6	93
XXVIII.	Comprobación de hipótesis estadístico z para n = 30	93
XXIX.	Cronograma	111
XXX.	Costos de materiales de zanja e invernadero	113
XXXI.	Costo de mano de obra para biodigestor tipo geomembrana PVC.	114
XXXII.	Presupuesto biodigestor anaerobio	114

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CH_3COOH	Ácido acético
AGV	Ácidos grasos volátiles
CaCO_3	Carbonato de calcio
C	Carbono
COT	Carbono orgánico total
R	Constante universal de los gases
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
CO_2	Dióxido de carbono
η	Eficiencia
w	Factor acéntrico
Z	Factor de compresibilidad
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
H_1	Hipótesis alternativa
H_0	Hipótesis nula
μ	Media
CH_4	Metano
m^3	Metro cúbico
mg	Miligramo
mL	Mililitro
NMP	Número más probable
Pa	Pascales
PVC	Polivinilcloruro

%	Porcentaje
K	Potasio
pH	Potencial de hidrógeno
SF	Sólidos fijos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TRH	Tiempo de retención hidráulico
m³/mol	Volumen molar (metro cúbico/mol)

GLOSARIO

Anaerobio	Medio que no utiliza oxígeno en su metabolismo.
Biodigestor	Tanque hermético en el que se produce la digestión anaerobia, permitiendo la carga de biomasa y descarga de bioabono y recolección de biogás.
Biogás	Mezcla de gases la materia orgánica en ausencia de oxígeno en un biodigestor.
Carbono orgánico	Es la cantidad de carbono de una variedad de compuestos orgánicos, descompuesta en una simple molécula que puede ser medida cuantitativamente.
Digestión anaerobia	Proceso en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno en un biodigestor.
Equilibrio simbiótico	Interacción conjunta que ocurre cuando dos organismos se benefician uno del otro a tal punto que llegan a depender uno del otro para su supervivencia.
Lodos efluentes	Es el lodo que ha pasado a través de una unidad de tratamiento, como por ejemplo la digestión anaerobia.

pH	Es la relación del contenido de iones libres en solución y representa el grado de acidez o alcalinidad del agua residual.
Sólidos totales	Es el material disuelto y en suspensión en una muestra de agua residual.
Sólidos volátiles	Son aquellos que se volatilizan a una temperatura de 600 °C.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó el montaje de un reactor piloto anaerobio para el tratamiento de residuos generados por la actividad industrial en un ingenio azucarero con el fin de producir biogás, el mismo se evaluó por un período de 2 meses, así mismo, se realizó un análisis estadístico mediante datos pareados de muestras tomadas en dos lotes con iguales proporciones.

Se determinó el potencial para generar biogás al lodo anaerobio contenido en el biodigestor a partir análisis físicos, químicos y microbiológicos. Se tomaron ocho muestras durante el tiempo de retención hidráulico de los dos lotes, cuatro de ellas durante el primer lote y las otras cuatro en el segundo lote; con el fin de comparar los lotes realizados y obtener un comportamiento general

Se monitoreó diariamente la presión producida al igual que la temperatura existente en el biodigestor, el pH se ajustó cerca de la neutralidad al inicio de cada experimento y se monitoreó cada día hasta la finalización de los mismos.

A partir de la medición del volumen de biogás producido, se realizaron pruebas de combustión para determinar si el biogás generado era rico en metano, mediante las pruebas se demostró una combustión completa, concluyendo que el biogás generado está constituido por 50 % de metano.

Bajo las condiciones trabajadas con los porcentajes de reducción obtenidos de los parámetros de salida respecto a los de entrada, media vez el reactor anaerobio sea operado bajo las condiciones de diseño establecidas, se

determinó que este es eficiente para el tratamiento de desechos en la industria azucarera tanto en la producción de biogás como de biofertilizante, para que posteriormente pueda implementarse el biodigestor tipo geomembrana PVC a gran escala para tratar un mayor volumen de desechos.

El análisis estadístico mostró que no hay diferencia significativa entre las medias obtenidas de las propiedades fisicoquímicas de los desechos anaerobios durante el proceso metanogénico para la obtención de biogás, pero existe una mejor aproximación en los resultados analizados en el segundo lote.

OBJETIVOS

General

Evaluar la digestión anaerobia en un biodigestor a escala piloto, como alternativa para la implementación de un biodigestor tipo geomembrana PVC para la producción de biogás a partir de desechos orgánicos en Ingenio Santa Ana.

Específicos

1. Determinar la cantidad de desechos que se utilizarán para definir el tamaño del biodigestor.
2. Construir y operar el reactor piloto anaerobio en sus diferentes lotes para la obtención de biogás.
3. Analizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos afluentes y efluentes durante el proceso metanogénico.
4. Determinar la eficiencia del biodigestor piloto producto de la fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos.
5. Evaluar la calidad y volumen de biogás generado en el biodigestor piloto a partir de los diferentes lotes.

Hipótesis de investigación

Los resultados obtenidos de las propiedades fisicoquímicas de los desechos anaerobios no presentan diferencia significativa durante el proceso metanogénico para la obtención de biogás con un nivel de confianza del 95 %.

Hipótesis nula:

No existe diferencia significativa de las medias obtenidas de las propiedades fisicoquímicas de los desechos anaerobios durante el proceso metanogénico para la obtención de biogás.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

Hipótesis alternativa:

Si existe diferencia significativa de las medias obtenidas de las propiedades fisicoquímicas de los desechos anaerobios durante el proceso metanogénico para la obtención de biogás.

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

INTRODUCCIÓN

Para permitir un desarrollo sostenible que llegue a los países en vías de desarrollo y a los países con economías muy bajas, es necesario un esfuerzo importante que permita una rápida introducción de las energías renovables que facilite una utilización más compatible con el medio ambiente de los recursos fósiles, garantizando una reducción considerable de las emisiones de gases de efecto invernadero y una mayor concientización en el uso eficiente de la energía. Es por ello que se han venido implementando nuevos métodos de degradación de efluentes, algunos de los cuales permiten, además el aprovechamiento energético de los gases que se originan de estos procesos.

Los proyectos de biogás-energía están reconocidos como fuentes de energía renovable de fácil implementación, se caracterizan frente a otras fuentes de energía renovable al proporcionar mayor seguridad en cuanto al abastecimiento energético, pues su producción no está limitada por las condiciones climáticas. Como energías renovables no convencionales se considera la derivada de la biomasa, ya sea a partir de su incineración directa o a través de la producción de biogás. Debido a esto, se ha buscado incursionar en la investigación de energías alternativas, como medida de acción para la conservación del medio ambiente, con el único propósito de aportar a la sociedad la implementación de nuevas propuestas o equipos para la reutilización de desechos orgánicos para la generación de elementos útiles.

En Ingenio Santa Ana se produce energía eléctrica a partir del bagazo de caña y carbón mineral. El proceso de obtención de biogás a partir de la fermentación anaerobia de materia orgánica, se presenta como una valiosa

alternativa factible de realizar a nivel industrial, tanto por los costos que requiere, como para el saneamiento ambiental logrado y la producción de energía que se origina.

Se pretende realizar la construcción de un reactor anaerobio para demostrar que la captación y utilización de gas metano, producto de la descomposición de materia orgánica, es una alternativa de fuente de energía sustituible del gas propano, que puede ser utilizada en cocinas industriales dentro del ingenio y por consiguiente el mejoramiento en el saneamiento de las aguas residuales para posteriormente evaluar la implementación de un biodigestor tipo geomembrana PVC; además de obtener y utilizar fertilizante natural que mejorará los cultivos de caña de azúcar, tomando en cuenta que es una mínima inversión y que el retorno de la misma es prontamente previsible.

1. ANTECEDENTES

La emisión de gases de efecto invernadero ha ido incrementando en forma desmedida atribuyéndosele a la quema de combustibles fósiles producto de actividades industriales para la obtención de energía, situación que ha creado la necesidad de promover la sustitución de fuentes de energía no renovables, costosas y contaminantes para el medio ambiente, mediante el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles, creando la implementación de la tecnología de los biodigestores, obteniendo como beneficio la producción de biogás.

La producción de biogás es un proceso que se lleva a cabo en condiciones anaerobias, también llamada fermentación anaeróbica, pudiéndose utilizar como fuente de generación eléctrica, convirtiendo el metano para alimentar la red de gas natural a través de biodigestores.

Asia es el continente que más instalaciones de biogás ha reportado. Desde 1973 se estableció la oficina de difusión del biogás y posteriormente el Centro Regional de Investigación en biogás para Asia y el Pacífico Sur adjunto al Ministerio de Agricultura. En la India, alrededor de 500 000 familias utilizan plantas de biogás para producir energía como sustituto del combustible doméstico. En Europa existen alrededor de 564 instalaciones productoras de gas biológico que representan unos 269 000 m³ de digestores, de estos, 174 000 m³ digestores corresponden a instalaciones industriales, el resto, 95 000 m³ de digestores corresponden a instalaciones agrícolas. El Reino Unido es el primer productor de biogás de la Unión Europea; de hecho, el biogás es la única fuente de energía renovable que está experimentando un crecimiento real

en ese país, el sector contaba con más de 292 megavatios (MW) eléctricos instalados a finales de 1999.

El biogás representa aproximadamente el 5 % de la energía procedente de la biomasa en Europa. Al inicio el desarrollo del biogás fue más fuerte en la zona rural, hoy el tratamiento de desechos municipales mediante instalaciones productoras de energía y abonos llevan el peso fundamental en el desarrollo de esta tecnología, donde se trabaja fuertemente por lograr cada día una eficiencia óptima de procesos con tiempo de retención extremadamente bajos (3 a 10h). Un reciente estudio de la ONU indica que para el 2025 se habrán construido más de 100 000 plantas de biogás en todo el mundo.

Respecto a Latinoamérica, en Cuba existen más de 100 plantas productoras de biogás, su fabricación se orienta a suplir las necesidades de cocción de alimentos y el calentamiento de agua en sectores rurales, reemplazando a los derivados del petróleo, la leña y el carbón. De acuerdo a estudios realizados, el potencial de biogás es de unas 100 000 toneladas de combustible aportados por las fábricas de azúcar, fábricas de levaduras, destilerías de alcohol, así como residuos de cerdos, vacunos, aves y del café.

Históricamente en Guatemala se han construido una gran variedad de biodigestores en el área rural, principalmente en el sector pecuario intensivo vinculado con efluentes continuos, como granjas porcinas o lecherías estabuladas. También en el gremio agrícola se han utilizado ampliamente y últimamente más como pretratamiento de aguas residuales ordinarias (de servicios sanitarios) en el área urbana. En la década de 1970 hubo un fuerte boom de reactores anaeróbicos derivado al alza del precio del petróleo. Estos

proyectos fueron comandados en esta época por entidades de capacitación o tecnificación como Intecap o Icaiti.¹

En Guatemala en el 2014 la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) aprobó el proyecto de biogás del vertedero El Trébol que generará 4,8 megavatios (MW), en la actualidad el proyecto está a cargo de la empresa Industrias de Biogás, S.A. (Inbio), desde mayo del 2015 este proyecto suministra 1 megavatio (MW) de energía a la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA), la generadora se encuentra ubicada en la zona 7, a un costado del vertedero, y la forma de operar es instalando varios pozos en el relleno sanitario y por medio de su tubería se obtiene y traslada el metano a pesar de que el proyecto es pequeño, su producción se refleja en la matriz energética desde mayo de 2015, Asimismo, empresas privadas como Empacadora Toledo busca la independencia energética utilizando al 100 % la energía eléctrica generada por biodigestores a partir de excremento vacuno.²

En Ingenio Santa Ana, año con año, uno de sus objetivos principales es contribuir con el medio ambiente y la mejora continua dentro del mismo con el fin de aumentar la productividad de sus procesos, implementando nuevos procedimientos y equipos para promover las diferentes formas de energía, mediante la optimización de los recursos.

En el área de cogeneración, Ingenio Santa Ana produjo su energía eléctrica a partir de la biomasa desde el comienzo de sus operaciones. En efecto, desde 1969 contó con una potencia instalada de 3 500 kW, hoy en día, la capacidad instalada actual es de 50 MW. Para tal efecto, Santa Ana cuenta con 8 calderas, divididas en dos bloques; el bloque 1 que consta de 7 calderas,

¹ HERNÁNDEZ, Juan Carlos. *Biodigestores en Guatemala*. p. 10.

² El Periódico, 2015.

las cuales trabajan utilizando solamente bagazo. En época de zafra, comprendida en los meses de diciembre a mayo genera 50 MW, y en época de reparación, durante los meses de junio a noviembre genera 25 MW de los cuales se consume el 10 % de la generación y el resto se vende a la EEGSA.

En el año 2014 se implementó el bloque 2, el cual está comprendido solamente por la caldera 8 que trabaja a base de carbón mineral generando 64 MW durante todo el año.

2. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala se presentan áreas que viven bajo un déficit energético importante a pesar de que poseen diversidad de recursos renovables, por lo que esta realidad genera nuevas alternativas para dar un valor a la materia prima produciendo la energía faltante, a partir de biomasa generada de forma masiva en la industria de alimentos. Además de contribuir directamente a la conservación del medio ambiente dando solución al problema del calentamiento global.

Utilizando residuos de materia orgánica en un biodigestor anaerobio, genera dos subproductos que se pueden utilizar, los cuales se han convertido en los últimos años en una de las alternativas más atractivas, sin contaminar al ambiente: el biogás a partir de la fermentación anaeróbica y fertilizante para uso en el sector agrícola por contener excelentes nutrientes.

La idea es realizar un proyecto de investigación debido al interés de Ingenio Santa Ana por contar con un sistema integral de manejo de desechos sólidos, ya que la ley de aguas 2-36 propone que para el año 2024 se tiene que dar el cumplimiento de la cuarta fase de los requisitos a cumplirse para la descarga y reuso de aguas residuales, así como para la disposición de los lodos, dando una solución al interés del manejo de dichos desechos, a través de la producción de biogás, mediante la digestión anaerobia de la materia orgánica, obteniendo como productos finales la producción de una fuente de energía sustituible al gas propano y un biofertilizante que puedan ser utilizados en Ingenio Santa Ana.

El desarrollo de un programa para el aprovechamiento de los residuos generados, es el inicio en el país en busca del beneficio colectivo en oportunidades de negocios verdes que sean autosostenibles y que a futuro sean la estrategia para disminuir costos en la producción de abastecimiento energético, generando conciencia en la mitigación del impacto ambiental, ya que actualmente los rellenos sanitarios trabajan a su máxima capacidad, emitiendo los gases tóxicos al medio ambiente, es por ello que este proyecto será un precedente sobre la factibilidad del uso de la digestión anaeróbica para el tratamiento de desechos industriales.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Ingenio Santa Ana ubicado en el municipio de Escuintla, no se cuenta con un sistema integral de manejo de desechos sólidos, lo cual aumenta la contaminación de los cuerpos receptores, generando gran acumulación de desperdicios.

Actualmente es de interés por parte de Ingenio Santa Ana contar con un sistema integral de manejo de desechos sólidos, por lo que es necesario la implementación de un biodigestor piloto como prueba para la disposición, aprovechamiento y tratamiento de los residuos, para que posteriormente pueda implementarse un biodigestor de geomembrana PVC para el tratamiento continuo de los desechos sólidos generados en Ingenio Santa Ana. A raíz de esta propuesta surgen las siguientes interrogantes.

- ¿Los desechos generados de las fosas sépticas, cocinas industriales de Ingenio Santa Ana y las excretas de origen vacuno de fincas aledañas, tienen potencial para la generación de gas metano a partir del proceso anaeróbico?
- ¿Qué variables participan en la producción de biogás?
- ¿Las características del reactor anaerobio son las óptimas para tratar los desechos generados en Ingenio Santa Ana?
- ¿Qué capacidad de combustión tiene el metano para generar energía eléctrica en cocinas industriales?
- ¿Cuál es el nivel de calidad de biogás producido con desechos sólidos generados en Ingenio Santa Ana?

- ¿Cuál es la cantidad de gas metano producido durante el tiempo de retención hidráulico al implementar la digestión anaeróbica de régimen por lotes en Ingenio Santa Ana?

4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Los alcances del tema de investigación se enfocan en el manejo y gestión de los residuos sólidos derivados de la actividad operaria y ganadera, así mismo, en determinar la factibilidad del uso de este tipo de desechos como materia prima a través de la implementación de un biodigestor que contribuya al desarrollo de un sistema de energía eléctrica, a través de la combustión de gas metano en Ingenio Santa Ana que sea ambientalmente aceptable, con el fin de contribuir a la disminución del impacto sobre el manto freático, flora y fauna, mediante la implementación del sistema integral de manejo de desechos sólidos.

Los desechos generados están conformados por aguas residuales de fosas sépticas, residuos de cocinas industriales y estiércol vacuno de granja aledaña. Para efectos de este estudio el enfoque será sobre la evaluación de la digestión anaerobia como técnica de tratamiento y para la generación de productos de amplio uso en la industria azucarera.

Los alcances que pretende esta investigación se dirigen a la población a nivel nacional, empresas privadas, entidades del estado, siendo estas, enlistadas a continuación:

- Industria alimenticia: (empresas dedicadas a la distribución de frutas y verduras, ingenios azucareros, ingenios cafetaleros, industrias de aderezos y mayonesas, entre otros).
- Propietarios de fincas con creciente demanda ganadera.

- Empresas, restaurantes y demás instituciones del estado que utilicen como materia prima los desechos sólidos orgánicos.
- Organizaciones y laboratorios que se dedican al desarrollo e investigación de fuentes de energía renovables y tratamiento de aguas residuales.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos. Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos; residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En todos estos procesos intervienen las bacterias metanogénicas, dichas bacterias son las encargadas de digerir la materia orgánica y devolver al medio ambiente los elementos básicos para reiniciar el ciclo. El proceso de digestión se compone de cuatro fases diferenciadas en el proceso de degradación del alimento de los microorganismos.³

5.1.1. Fase de hidrólisis

Las bacterias en esta primera etapa toman la materia orgánica con sus largas cadenas de estructuras carbonadas y la hidrolizan por la acción de enzimas producidas por bacterias hidrolíticas, rompiendo y transformando las cadenas de estructuras carbonadas, haciéndolas más cortas y simples (ácidos orgánicos). Las proteínas, carbohidratos y lípidos se transforman respectivamente en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. Este trabajo es

³ FLOTAT, Xavier, CAMPOS, Eduardo & BONMATI, August. *Aprovechamiento energético de residuos ganaderos*. p. 45.

llevado a cabo por un complejo de microorganismos de distinto tipo que son en su gran mayoría anaerobios facultativos.⁴

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

5.1.2. Fase de acidificación (acidogénesis)

Esta etapa la llevan a cabo las bacterias acidificantes y transforman la materia orgánica disuelta (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos) en dióxido de carbono (CO_2) más hidrógeno gaseoso (H_2) y ácidos grasos volátiles (AGV). Esta reacción es endoenergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que sustraen los productos finales del medio, minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza de oxígeno disuelto del sistema.

⁴ HILBERT A. Jorge. *Manual para la producción de biogás*. p. 19.

5.1.3. Fase acetogénica

Durante esta fase los intermediarios metabólicos son transformados en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno por un mecanismo complejo. Se considera que son tres los grupos que intervienen: las bacterias homoacetogénicas, las sintótrofas y las sulfato-reductoras. La mayoría de ellas son anaerobias estrictas: *propionobacterium*, *bacteroides*, *micrococcus*, *clostridium*. Ciertas bacterias anaerobias facultativas pueden estar también implicadas en la producción de ácidos grasos volátiles: *streptococcus bacillus* y *enterobacterium*.

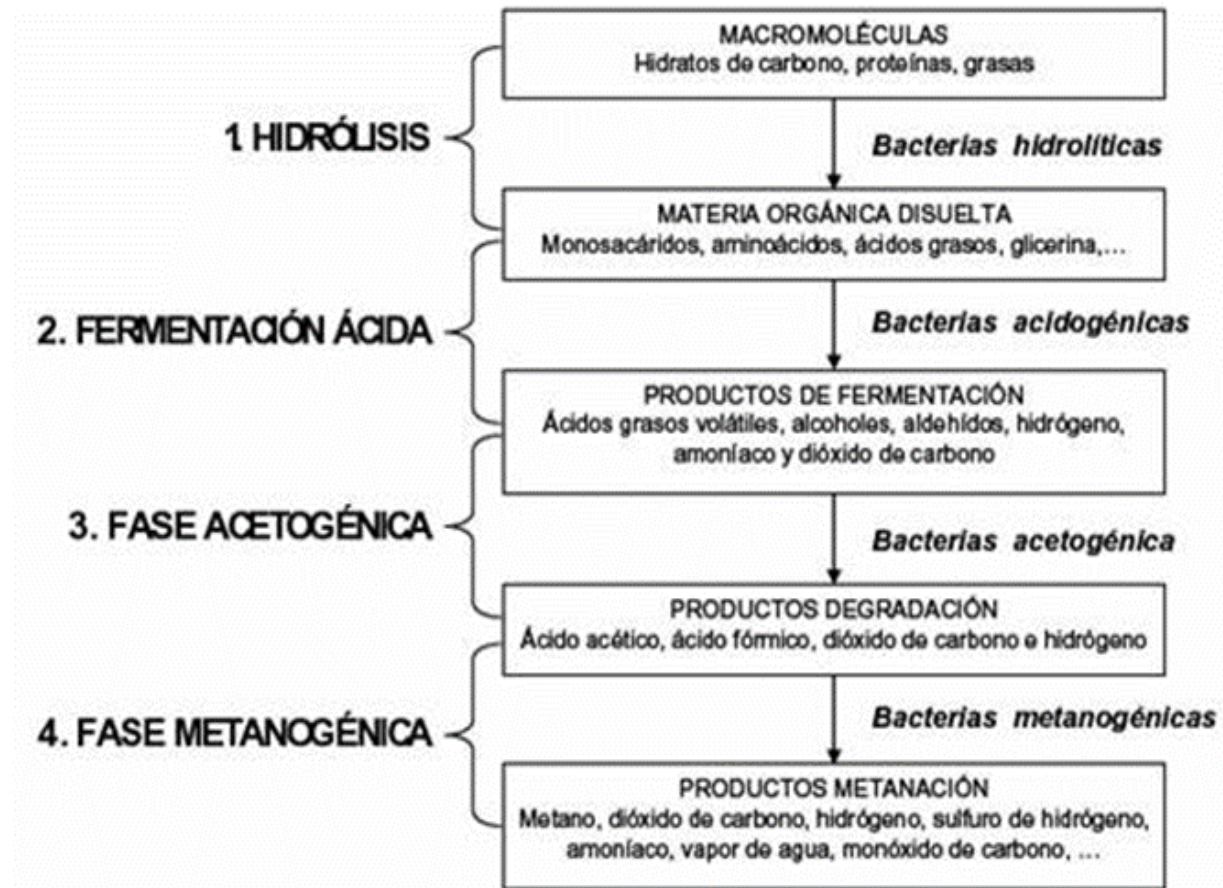
Las bacterias homoacetogénicas producen acetato a partir de la reducción de dióxido de carbono. Paralelamente las bacterias sintótrofas oxidan los productos de la primera fase (fundamentalmente propiónico y butírico) en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. Estas bacterias son anaerobias estrictas y dependen para su crecimiento de la eliminación del hidrógeno del medio, ya que es un inhibidor de la acetogénesis.

5.1.4. Fase metanogénica

Las bacterias que intervienen en esta etapa pertenecen al grupo de las achibacterias y poseen características únicas que las diferencian, por lo cual se cree que pertenecen a uno de los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre. La transformación final cumplida en esta etapa tiene como principal sustrato el acético junto a otros ácidos orgánicos de cadena corta y los productos finales liberados, están constituidos por el metano y dióxido de carbono. La cinética del proceso al igual que la velocidad de formación de nuevas bacterias es baja. Son sensibles a cambios de temperatura y pH (próximo a 7). La figura 1 resume las distintas características

de cada una de las etapas involucradas en el proceso, con los principales compuestos químicos intervinientes.

Figura 1. **Etapas de la fermentación anaeróbica**



Fuente: PAVLOSTATHI Spyros y GÓMEZ, Giraldo. *Cinética de un tratamiento anaerobio*. p. 63.

5.2. **Microbiología y bioquímica de la digestión anaeróbica**

El proceso de digestión anaerobia abarca toda una serie sumamente compleja de reacciones bioquímicas provocadas por el cultivo de una mezcla de bacterias de cuatro grupos diferentes. La digestión efectiva de la materia

orgánica a metano requiere del metabolismo coordinado y combinado de diferentes grupos de microorganismos, los cuales pueden ser diferenciados sobre la base de los sustratos que utilizan y los productos metabólicos finalmente formados. El esquema biológico involucra reacciones de multiorganismos con multisustratos que se llevan a cabo en serie y en paralelo.⁵

En la tabla 1 y en la figura 2 se reportan las principales reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en el proceso de la digestión anaerobia.

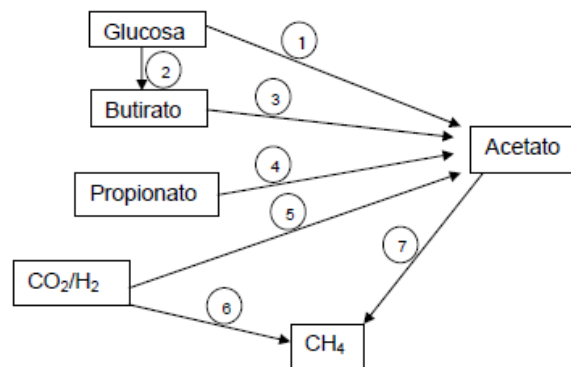
Tabla 1. **Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de la materia orgánica**

	Tipo de reacción	Ecuación
1	Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$
2	Fermentación de glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
3	Fermentación del butirato a acetato e H_2	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
4	Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
5	Acetogénesis a partir de H_2 y CO_2	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
6	Metanogénesis a partir del CO_2 y H_2	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
7	Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Fuente: DÍAZ DOMÍNGUEZ, Yosvany. *Empleo de pretratamientos básicos para mejorar la digestión anaerobia de los residuales domésticos en la planta de biogás Sobacken*. p. 16.

⁵ DIAZ DOMINGUEZ, Yosvany. *Diagnóstico operacional de planta de biogás*. p. 32.

Figura 2. **Mapa conceptual de reacciones bioquímicas para la producción de metano (CH₄)**



Fuente: DÍAZ DOMÍNGUEZ, Yosvany. *Empleo de pretratamientos básicos para mejorar la digestión anaerobia de los residuales domésticos en la planta de biogás Sobacken*, p. 28.

5.2.1. Bacterias hidrolíticas – fermentativas (grupo I)

Las bacterias que llevan a cabo las reacciones de hidrólisis y acidogénesis son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que participan son los miembros de la familia Enterobacteriaceae, además otros géneros *bacillus*, *peptostreptococcus*, *propionibacterium*, *bacteroides*, *micrococcus* y *clostridium*.

5.2.2. Bacterias acetogénicas (grupo II)

Para que tenga lugar una eficiente metanogénesis, los productos de fermentación como el propionato y el butirato deben ser oxidados a acetato, dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H₂). Esta oxidación es llevada a cabo por un grupo denominado: *organismos acetogénicos productores obligados de hidrógeno*, *OHPA*, por sus siglas en inglés, mediante un proceso conocido como acetogénesis.

Dentro del grupo de acetógenos existe un grupo de bacterias conocidas como bacterias homoacetogénicas, las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el dióxido de carbono (CO₂), como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia. Aunque este no es un grupo taxonómico definido, en él se incluyen una variedad de bacterias Gram (+) y Gram (-) formadoras de esporas.

5.2.3. Bacterias metanogénicas (grupo III)

Las bacterias metanogénicas pertenecen al grupo actualmente conocido como archaea, las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas y producen metano como principal producto del metabolismo energético. A pesar de los requerimientos estrictos de anaerobiosis obligada y el metabolismo especializado de este grupo, estas bacterias se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza.

5.3. Factores determinantes en el proceso metanogénico (producción de biogás)

Los factores que influyen en la producción de biogás son el potencial de hidrógeno (pH), temperatura del ambiente, contenido de sólidos, nutrientes y sustancias tóxicas, entre otros. Durante los procesos de biodigestión se deben controlar la temperatura y el pH, manteniéndolos estables a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes.

5.3.1. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico entre otros. Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico.

Tabla II. **Residuos orgánicos de diversos orígenes**

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: VARNERO, Juan Manuel y ARELLANO, Esteban. *Residuos Orgánicos*. p. 86.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Tabla III. Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal y vegetal

Materia Prima	C (%)	N(%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO(%)	MgO (%)
Excretas:						
Bovino	17,4 – 40,6	0,3 – 2,0	0,1 – 1,5	0,10	0,35	0,13
Porcino	17,4 - 46,0	1,1 – 2,5	0,4 – 4,6	0,30	0,09	0,10
Caprino	35,0 – 50,0	1,0 – 2,0	0,2 – 1,5	2,30		
Equino	35,0 - 52,0	0,3 – 0,8	0,4 – 1,6	0,35	0,15	0,12
Ovino	35,0 – 46,0	0,3 – 0,6	0,3 – 1,0	0,15	0,33	
Conejos	23,0 - 35,0	1,0 – 1,9	0,9 – 1,8	2,10	0,45	0,15
Aves	28,0 – 35,0	1,4 – 2,0	2,0 – 2,8	1,40	0,80	0,48
Patos	29,0 - 41,0	0,6 – 0,8	1,0 – 1,5	0,40	0,80	
Pavos	17,4 – 41,0	0,6 – 0,8	0,5 - 0,8	1,10	0,80	
Humanas	2,5	0,8 – 1,0	0,5	0,30		
Mezclas:						
Porcino+paja	20,0 – 22,0	0,3 – 0,5	0,24	0,63	0,20	
Bovino+paja	44,0 – 46,0	0,3 – 0,5	0,79	1,55	0,30	
Rastrojo:						
Caña maíz	30,0 – 40,0	0,8 – 1,8	0,4 – 0,6	2,40	0,50	0,49
Paja de trigo	16,0 – 46,0	0,53	0,70	0,40	0,26	0,16
Paja de avena	22,0 – 29,0	0,53	0,40	0,30	0,40	
Paja cebada	58,0	0,64	0,19	1,07	0,33	0,33
Paja arroz	40,0 – 42,0	0,64	0,60	0,40	0,60	
Paja haba	28,0 – 33,0	1,5 – 1,9	0,40	2,30	1,35	
Tomate	27,0 – 30,0	2,60				
Papas	30,0	0,34	0,16	0,58	0,64	
Betarraga	30,0	2,00	0,70	5,30	1,95	0,83
Rabanitos	30,0	2,50				
Hojas secas	35,0 – 40,0	1,00	0,30	0,20	2,00	
Aserrín	44,0	0,06	0,01	0,01		

Fuente: VARNERO, Juan Manuel y ARELLANO, Esteban. *Residuos Orgánicos*. p. 116.

Se pueden clasificar los sustratos en cuatro clases en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO), (DBO).⁶

5.3.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

En referencia a la demanda química de oxígeno DQO, FLOTATS, CAMPOS Y BONMATI (1997, p. 3) explican que por el principio de conservación de la materia, en un biodigestor anaerobio la cantidad eliminada de DQO, medida indirecta de la concentración de materia orgánica del residuo a tratar, se convierte en gases. Por este principio, la cantidad máxima de metano producible es de 0,35 m³ de CH₄/kg DQO eliminada en condiciones de temperatura y presión normales.

FLOTATS, ET AL (2011, s/p) refiere que la materia orgánica puede expresarse en unidades de sólido volátil (SV) o sólido suspendido volátil (SSV, SV no solubles). Pero la principal medida que se utiliza en digestión anaeróbica es la demanda química de oxígeno (DQO). Esta expresa el equivalente de O₂ necesario para oxidar completamente la materia orgánica. Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH₄ y CO₂, y teniendo en cuenta que la DQO es nula, la DQO eliminada en el residuo se corresponderá con la DQO obtenida en forma de metano, lo cual significa 0,35 m³ de CH₄ por kg de DQO eliminada, a p= 1tm y T= 0 °C. A partir de la composición elemental de un residuo podría predecirse el potencial teórico de la transformación de metano, pero estos valores teóricos son una aproximación, ya que parte del sustrato se transformará en microorganismos anaerobios, y algunos residuos pueden contener compuestos no biodegradables”.

⁶ VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual de biogás*. p 48.

Señalan que tanto el DBO y el DQO son indicadores muy comunes de contaminación de las aguas. La gran diferencia entre el DBO y el DQO se debe a que en el primer indicador solamente se contabiliza el oxígeno consumido por los microorganismos para descomponer la materia orgánica degradable. Por su parte, el DQO mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica degradable, así como también los restos de materiales fibrosos, lignina y otros.

Tabla IV. **Disminución de la contaminación medida indirectamente a través de DQO**

<i>Parámetros</i>	<i>Demanda Química de Oxígeno DQO</i>
Entrada al biodigestor	3095 mg/l
Salida del biodigestor	347 mg/l
Porcentaje de remoción	89 %

Fuente: LÓPEZ, Antonio. *Gestión integral del tratamiento de aguas residuales*. p. 83.

5.3.3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Este parámetro mide la digestibilidad de los residuos y es el consumo de oxígeno (mg/l de suspensión) durante la degradación por microorganismos durante 5 días a 20 °C. Tanto la DBO como la DQO son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar.⁷

⁷ LÓPEZ, Antonio. *Gestión integral del tratamiento de aguas residuales*. p. 88.

5.3.4. Ácidos grasos volátiles

El contenido en ácidos grasos volátiles en el interior de un biodigestor es uno de los parámetros más útiles en el control del estado metabólico del proceso. Teniendo en cuenta que estos ácidos juegan un importante papel como intermediarios en la formación del metano, la acumulación de alguno de ellos indica la modificación de las condiciones metabólicas en el digestor; por tanto, cualquier inhibición de las etapas finales de la metanogénesis provocará un aumento de la concentración de ácidos volátiles y un descenso de pH.

El límite de concentración ácidos volátiles para que el proceso sea estable varía según los datos encontrados en la bibliografía. Puede variar entre los 200 mg/l (referido a ácido acético equivalente) y los 2 000 mg/l, concentración a la que se inhiben las bacterias metanogénicas pero no así las acidogénicas. No obstante, este intervalo puede variar dependiendo del tipo de residuo a digerir, pues se han llegado a encontrar concentraciones superiores a los 5 000 mg/l en digestores que funcionan normalmente cuando se alimenta estiércol de gallina.

5.3.5. Alcalinidad

La alcalinidad es una medida del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos de calcio, magnesio, sodio y potasio fundamentalmente; se expresa en mg CaCO_3 /l, y representa la capacidad tampón del contenido del biodigestor.

Un digestor con una alcalinidad superior a 1 000 mg/l (a pH 6.0), presenta una buena capacidad de respuesta frente a rápidos aumentos en el contenido de ácidos volátiles, establece que para un valor de la alcalinidad comprendido entre 2 500 y 5 000 mg CaCO_3 /l se obtiene un margen de operación seguro en el tratamiento anaerobio de residuos.

5.3.6. Carbono orgánico total

Es uno de los parámetros en el estudio de la contaminación del agua por compuestos orgánicos, normalmente el carbono es oxidado a dióxido de carbono por combustión. La cantidad de carbono orgánico total presente en el agua puede calcularse a partir de la cantidad de dióxido de carbono medida.

5.3.7. Coliformes fecales

Los coliformes son bacterias que habitan en el intestino de los mamíferos y también se presentan como saprófitos en el ambiente, excepto la *Escherichia*, que tiene origen intestinal.

Los coliformes tienen todas las características requeridas para ser un buen indicador de contaminación. Este grupo de microorganismos pertenece a la familia de las entero bacteriáceas. Se caracterizan por su capacidad de fermentar la lactosa a 35-37 °C en un lapso de 24-48 horas y producir ácido y gas. Los siguientes géneros conforman el grupo coliforme: *Klebsiella*, *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter* y *Serratia*. De este grupo, la *Escherichia* y ocasionalmente la *Klebsiella* tienen la capacidad de fermentar la lactosa, no sólo a las temperaturas indicadas, sino también a 44,5 °C. A los miembros de este grupo se les denomina coliformes termo tolerantes (fecales).

5.3.8. Nitratos y nitritos

El nitrógeno presente en agua es un nutriente muy importante para el desarrollo de animales y plantas acuáticas. Cuando una porción de agua se encuentra muy contaminada, el nitrógeno presente se encuentra como nitrógeno amoniacal, pero puede ser oxidado por la cantidad de oxígeno

disuelto a nitratos y nitritos, esto depende también del pH del agua y la temperatura.

En general, los nitratos (sales de ácido nítrico) son muy solubles en agua debido a su polaridad; el material nitrogenado tiende a transformarse en nitratos. Los nitritos (sales de ácido nitroso) se forman principalmente de la oxidación bacteriana incompleta de nitratos o bien por reducción bacteriana. El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados o por contaminación debido a la acumulación de excretas humanas o animales, contribuyen a la concentración de nitratos en los cuerpos del agua.

5.3.9. Relación carbono/nitrógeno de las materias primas

La calidad y cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Existen muchos criterios en lo referente a esta relación, pero se reconoce en general como aceptable una relación carbono/nitrógeno de 20-30:1.

Las excretas de humanos y de animales son ricos en nitrógeno, con una relación carbono/nitrógeno inferior a 25:1, durante la fermentación tienen una mejor velocidad de biodegradación y de generación de gas; en cambio los residuos agrícolas son ricos en carbono, con una relación carbono/nitrógeno

superior a 30:1, pero con una generación más lenta de gas en el proceso de digestión.

En general, las materias primas ricas en nitrógeno producen más gas que las ricas en carbono, asimismo, es más rápida la producción de gas a partir de materias primas nitrogenadas (excretas), que las ricas en carbono (paja y tallos). Mientras en los primeros 10 días de fermentación, las materias primas nitrogenadas generan de 34,4 – 46 % del total de gas producido, las ricas en carbono solo aportan el 8,8 %.⁸

Tabla V. **Relación carbono/nitrógeno de las materias primas empleadas**

Materiales	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1

Fuente: VERA GUEVARA, Antonio. *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. p. 90.

Por ello para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, es conveniente combinar proporciones adecuadas de materiales con bajo y alto rendimiento y de distintas velocidades de generación; también es conveniente agregar las materias ricas en nitrógenos a las materias

⁸ FAO, *Reciclaje de materias orgánicas y biogás*. p. 36.

primas de alta relación carbono/nitrógeno, a fin de bajar esta relación, por ejemplo, residuos de animales y humanos.⁹

5.3.10. Niveles de sólidos totales y volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). Los ST representan la cantidad de materia que permanece como residuo seco después de una evaporación, entre 103 y 105 °C, mientras que los sólidos volátiles representan la parte de los sólidos totales de la materia que están sujetos a pasar a fase gaseosa.¹⁰

Tabla VI. **Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos**

Materias primas	% Sólidos totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4 – 56.2
Porcinos	15.0 – 49.0
Aves	26.0 – 92.0
Caprinos	83.0 – 92.0
Ovejas	32.0 – 45.0
Conejos	34.7 – 90.8
Equinos	19.0 – 42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.0 – 90.0
Paja arroz	88.8 – 92.6
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0
Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
Aserrín	74.0 – 80.0

Fuente: VARNERO, Juan Manuel y ARELLANO. *Esteban. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores.* p. 132.

⁹ VERA GUEVARA, Antonio. *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales.* p. 86.

¹⁰ FORGET, Astrid. *Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares.* p. 73.

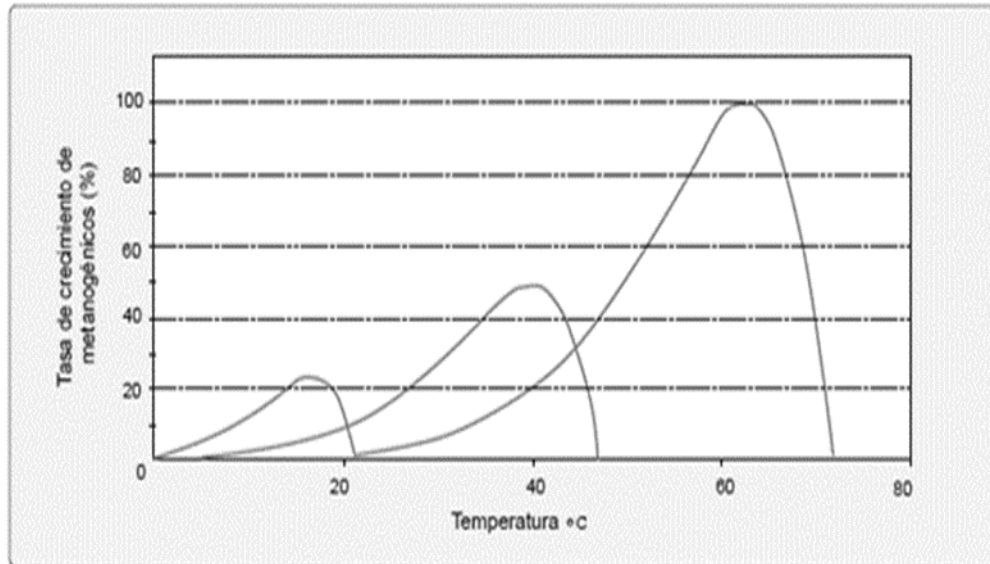
5.3.11. Temperatura

Los procesos anaeróbicos son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, depende de la temperatura, dando lugar a mayores producciones de biogás.

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

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

Figura 3. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesófilicos y termófilicos



Fuente: SPEECE, Ryan Ericson. Trace metals in anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. p. 20.

Tabla VII. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

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

Fuente: LAGRANGE, Bart. *Biomethane principles techniques*. p. 72.

El rango psicrófilico se plantea poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario, sin embargo, presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de temperatura de operación.

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para conseguir una mayor velocidad del proceso, sin embargo, el régimen termofílico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta problemas mayores de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal (NH₃) o los ácidos grasos volátiles (AGV).¹¹

5.3.12. Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Es el tiempo necesario de contacto entre el residual líquido y los microorganismos para lograr la remoción de la materia orgánica deseada. El metabolismo de los microorganismos anaerobios resulta lento, por ello el tiempo de contacto, entre ellos y el sustrato debe ser prolongado, basándose en la temperatura de trabajo. A mayor temperatura, menor tiempo de retención hidráulico.

Tabla VIII. **Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones**

Tiempo de retención hidráulico	Características
30 – 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central.
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. India, Filipinas, Etiopía.
60 – 90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía.

Fuente: Fuente: LAGRANGE, Bart. *Biomethane principles techniques*. p. 72.

¹¹ VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual del biogás*. p. 35.

5.3.13. Velocidad de carga orgánica

La velocidad de carga orgánica (VCO) es la cantidad de materia orgánica introducida de acuerdo al régimen con el que opere el reactor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que incrementa la carga volumétrica, disminuye el tiempo de retención. El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato y la temperatura de operación, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor. Por lo tanto, la selección de una mayor temperatura implicará la disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

5.3.14. Potencial de hidrógeno (pH)

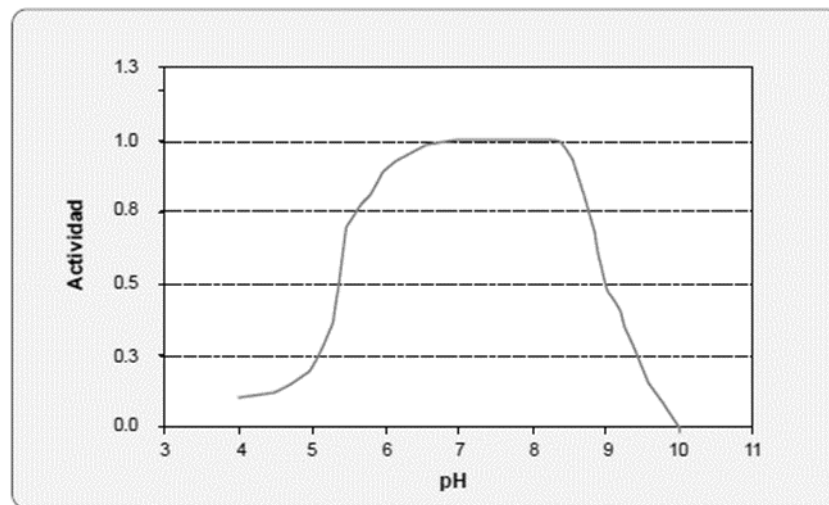
El proceso metanogénico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5,5 y 6,5 para acidogénicos y entre 7,8 y 8,2 para metanogénicos.

Para que el proceso de desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0. El valor de pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Debido a que la metanogénesis se considera le etapa

limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad.

Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético (CH_3COOH) e hidrógeno molecular (H_2). Al aumentar la presión parcial del H_2 , las bacterias que degradan el ácido propiónico son inhibidas, causando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular, particularmente ácidos propiónico y butírico, los cuales disminuirán la producción de ácido acético, generando una disminución de pH.

Figura 4. **Dependencia del pH de la actividad metanogénica**

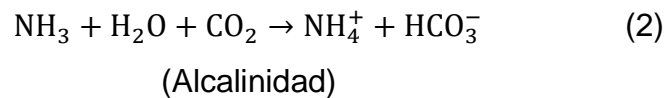
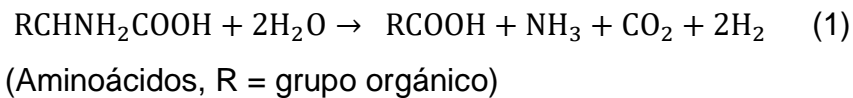


Fuente: SPEECE, Ryan Ericson. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*.

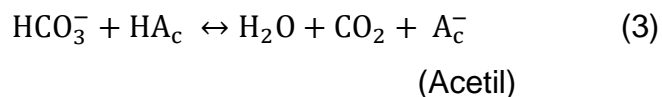
p 62.

La drástica caída de la actividad metanogénica sobre el pH 8,0 se debe al cambio de NH_4^+ a formas más tóxicas no iónicas de NH_3 . Debido a que los metanogénicos son vulnerables a cambios bruscos en el pH fuera del rango

óptimo, el sistema anaeróbico requiere una capacidad buffer suficiente (alcalinidad) para mitigar los cambios en el pH. El pH de un sistema anaeróbico, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema. La destrucción de la materia orgánica, principalmente las proteínas, al presentar alto contenido de nitrógeno orgánico, liberan amoníaco. Cada mol de nitrógeno orgánico teóricamente genera un equivalente de alcalinidad. El amoníaco reacciona con el dióxido de carbono durante una reacción bioquímica para producir bicarbonato de amonio, el cual contribuye a la alcalinidad del sistema, tal como muestran las siguientes reacciones:



Cuando los ácidos grasos volátiles (AGV) comienzan a acumularse en el reactor anaeróbico, son neutralizados por la alcalinidad presente en el reactor y mantienen el pH estable como se muestra en la siguiente reacción:



En muchos casos para mantener el pH óptimo en el reactor, es necesaria la suplementación de alcalinidad utilizando químicos, tales como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoníaco, cal, hidróxido de

sodio y potasio. Se prefiere el bicarbonato de sodio debido a su alta solubilidad y baja toxicidad.¹²

5.3.15. Promotores e inhibidores de la fermentación

Los promotores son materiales que pueden fomentar la degradación de la materia orgánica y aumentar la producción de gas; entre ellos están las enzimas, sales orgánicas, urea y carbonato de calcio. Cuando se carga el digester, es útil agregar celulosa para promover el proceso y la producción de gas.

La urea y el carbonato de calcio han dado buenos resultados. El primero acelera la producción de metano y la degradación del material, el segundo es útil para aumentar el contenido de metano en el gas. En relación a los inhibidores, la alta concentración de ácidos volátiles (más de 2000 ppm en la fermentación mesofílica), la excesiva concentración de amoníaco y nitrógeno, destruyen las bacterias. Muchas sales como los iones metálicos son fuertes inhibidores.¹³

¹² VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual de biogás*. p. 43.

¹³ VELSEN VAN & LETTING G. *Effect of feed composition on digestion performance in anaerobic digestion*. p. 38.

Tabla IX. **Concentración inhibidora de inhibidores comunes**

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5 000 ppm
NaCl	40 000 ppm
Nitrato (Según contenido de nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/L
Cr	200 mg/L
Ni	200-500 mg/L
CN	25 mg/L
Detergente sintético	20-40 mg/L
Na	3 500-5 500 mg/L
K	2 500-4 500 mg/L
Ca	2 500-4 500 mg/L
1 000-1 500 mg / l	1 000-1 500 mg/L

Fuente: FAO, 1986.

5.3.16. Agitación – mezclado

Los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos, producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios muertos sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cual el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicará una pérdida en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás.

La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el tiempo de retención hidráulica, esto es básicamente por cuatro razones:

- Distribución uniforme de la temperatura y sustrato en el interior del biodigestor.
- Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- Mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulo alrededor de las bacterias.
- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada espuma que dificulta la salida del biogás.

Se distinguen tres tipos de agitación, estas son:

- Mecánica: a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- Hidráulica: a través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa.
- Burbujeo de biogás: se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa.¹⁴

5.4. Biodigestor

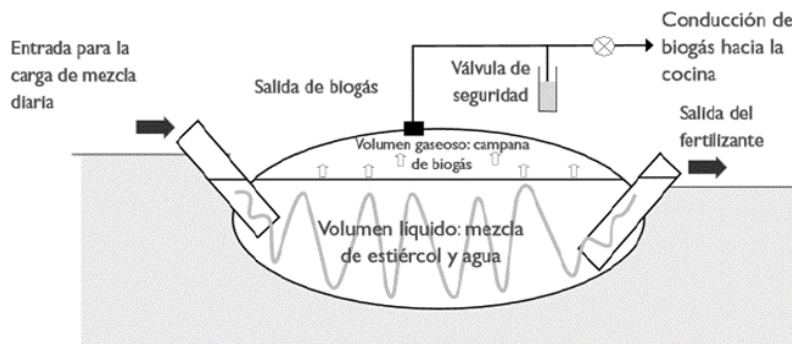
Los biodigestores son depósitos-tanques completamente herméticos en los que se produce la digestión anaerobia, permitiendo la carga de sustratos (biomasa) y descarga de bioabono y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético.

¹⁴ VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual de biogás*. p. 63.

La tecnología del biogás está bien adaptada a las exigencias ecológicas, ambientales y económicas del futuro. Es una tecnología de avanzada y de mucha aceptación por tratarse del aprovechamiento de energías renovables. El biodigestor es una forma barata y fácil de obtención de energía que tiene gran potencial para ser desarrollada y utilizada ampliamente.¹⁵

Un biodigestor o planta de biogás se compone de un tanque de homogenización o carga, el tanque de biodigestión, agitador, tuberías de captación de biogás, gasómetro, tanque de descarga, tuberías y válvulas de seguridad, cierre y desagües, filtro de remoción de H₂S, trampa de agua, entre otros.¹⁶

Figura 5. Esquema básico de un biodigestor



Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. *Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación*. p. 28.

¹⁵ ALCÍVAR GONZALEZ, Byron Fernando & FARIAS JAEN, Cristhian. *Estudio para la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica alternativo a partir de desechos biodegradables*. p. 132.

¹⁶ ARCE GONZALEZ, Jorge Jimmy. *Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable a zonas agrarias del litoral*. p. 103.

5.4.1. Tipos de biodigestores

Las plantas para la producción de biogás se pueden clasificar en:

- Continuas: se cargan y descargan de forma periódica, por lo general diariamente el material de fermentación debe ser fluido y uniformes. El efluente que descarga es igual al afluente o material de carga, con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras, corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación para su control.
- Semicontinuos: cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digestor indiano y chino.
- Discontinuas o por lotes: los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lotes, después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación.¹⁷

¹⁷ VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual de biogás*. p. 74.

5.4.1.1. Pozos sépticos

Es el más antiguo y sencillo biodigestor anaeróbico que se conoce, utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas. Se cree que de allí deriva el uso potencial de los gases producidos por la fermentación anaeróbica, para el uso doméstico. Para la correcta operación de estos pozos es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en él, de las que contienen jabón o detergentes.

El efecto de los jabones y en especial de los detergentes, inhibe la acción metabólica de las bacterias, razón por la que los pozos se colman con rapidez y dejan de operar, haciendo necesario destaparlos frecuentemente para comenzar la operación. Cuando no es posible separar las aguas negras de las jabonosas, como en el alcantarillado urbano, es necesario hacer un tratamiento químico con polímeros a esta agua, a fin de solucionar el problema antes de iniciar la fermentación anaeróbica.

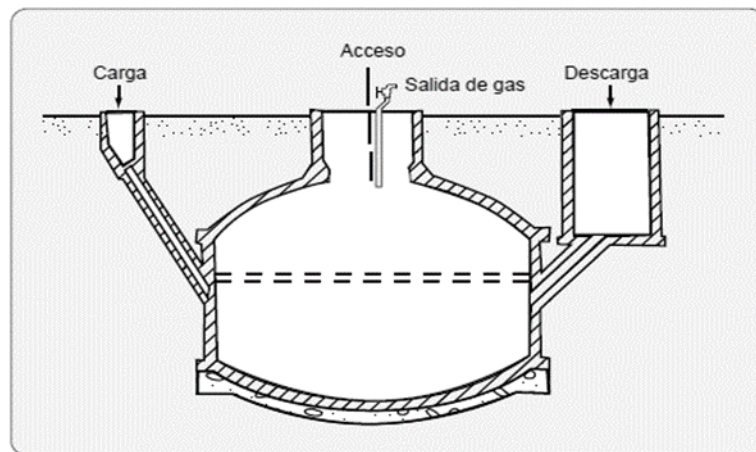
5.4.1.2. Biodigestor de domo fijo (modelo chino)

Los digestores de este tipo son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo y se construyen totalmente enterrados.¹⁸ Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas compostados, mezclados con lodos activos de otro digestor, a través de la cubierta superior, que es removible. Una vez cargado así, es alimentado diariamente con los residuos que se encuentren disponibles, provenientes de la letrina y de los animales domésticos, a través del tubo de carga el cual llega a la parte media del digestor.

¹⁸ FAO, 1986.

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo del digestor, aumenta su presión forzando al líquido, en los tubos de entrada y salida a subir y llegándose a alcanzar presiones de hasta 100 cm de columna de agua. Se generan entre 0,15 y 0,20 volúmenes de gas por día. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generar el gas y disminuye al consumirse este, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores.

Figura 6. **Biodigestor tipo chino**



Fuente: Manual de biogás.

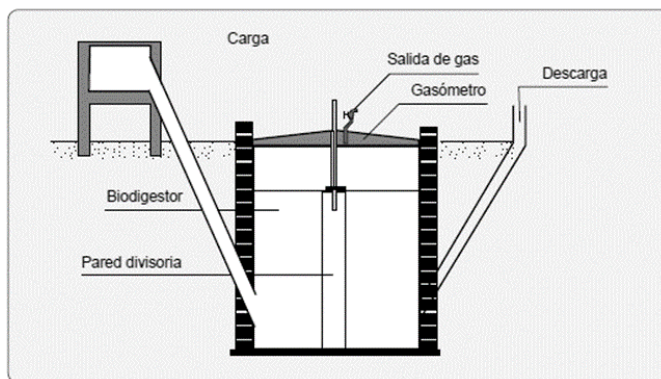
A pesar que el digestor chino es poco eficiente para generar biogás es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general largos y además se tiene gran cantidad de este material cuando se necesita para mezclar con el suelo antes de la siembra. Los tiempos de retención de operación para los biodigestores tipo chino son de 30 a 50 días. Tiene como ventaja su elevada vida útil (puede llegar a 20 años como promedio), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

5.4.1.3. Modelo indiano

Estos digestores son enterrados y verticales semejando a un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás, si se mantienen las condiciones de operación.¹⁹

El gasómetro está integrado al sistema en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 30 cm de columna de agua. Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. La campana también ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos biodigestores.

Figura 7. Biodigestor tipo indiano



Fuente: Manual de biogás.

¹⁹ HILBERT, Jorge Antonio. *Manual para la producción de biogás*. p. 86.

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos. Este tipo de digester presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0,5 y 1,0 de volumen de gas por volumen de digester por día.

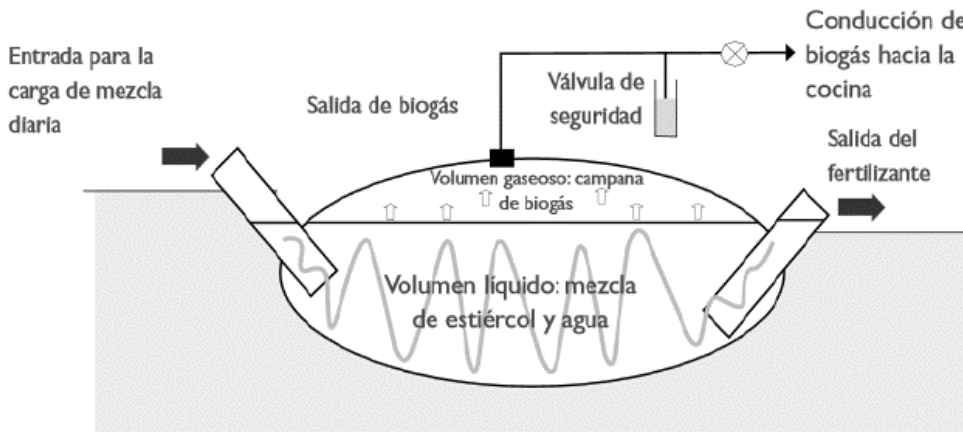
5.4.1.4. Biodigester tipo Taiwán, tubular o salchicha

En 1970 fue usado un residuo de menor costo proveniente de las refineras de aluminio, y veinte años después se recurrió al PVC y al polietileno, material vigente hoy principalmente en América Latina. En términos generales, la estructura de la cámara de digestión consiste en un cilindro hecho de una membrana impermeable a los gases y líquidos (nylon, caucho, PVC, polietileno) que es depositado en forma horizontal en una fosa excavada en el suelo.

En este digester el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma.

Aunque este modelo trabaja a presiones bastantes bajas, no funciona con residuos orgánicos fibrosos y la duración del cilindro es de unos cinco a 10 años (aunque de fácil reemplazo). Es el modelo menos costoso en su construcción, pues su precio máximo es la décima parte que el modelo menos costoso en otras versiones.

Figura 8. **Biodigestor tipo Taiwán**



Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. *Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación*. p.28

Este biodigestor presenta los siguientes componentes:

- **Tubo de admisión:** es un tubo de plástico de 20 a 30 cm de diámetro, que debe usarse para la admisión de desechos y sumergirse en los residuos al menos a 15 cm de profundidad, lo cual previene el escape del metano.
- **Fermentador y bolsa de almacenamiento:** este es el principal comportamiento del biodigestor. La bolsa de almacenamiento está en la parte superior del biodigestor.
- **Tubo de afluente:** el diámetro del tubo debe ser de 4 a 6 pulgadas de plástico. Se localiza por debajo del tubo de entrada en el lado opuesto del digestor, se debe mantener flujo constante.
- **Tubo de metano:** se ubica en la parte de la bolsa de almacenamiento de metano. Este tubo debe tener 2 pulgadas de diámetro y se usa para transportar el biogás a su lugar de uso. El tubo posee una salida que está sumergida en agua y que drena la humedad condensada.

- Dispositivo de seguridad: este se utiliza para prevenir la ruptura del fermentador debido a presiones altas de la digestión anaerobia de los desechos. Consiste en una botella de al menos 10 cm de profundidad, insertada en el tubo de salida; cuando la presión del digestor es mayor a la del agua, se libera el biogás.
- Tubo de limpieza. el lodo que se sedimenta en el fondo del biodigestor debe ser removido cada dos años. La tubería sirve para evacuar estos lodos por mecanismo como bombeo. Se puede disponer cuando el biodigestor es muy largo, de un tubo en un extremo del biodigestor y otro tubo en la mitad del mismo.

5.4.2. Implementación de un biodigestor

Para lograr la implementación de un proyecto de producción de biogás, se debe tener en cuenta los aspectos relacionados a costos, así como a la viabilidad del mismo, bajo el punto de vista del beneficio económico observado.

Se describirán los aspectos claves para la implementación de un biodigestor tipo geomembrana PVC que es el que se desea implementar por medio de un reactor anaerobio de tipo doméstico que fue con el que se realizó la prueba piloto, con el fin de obtener los beneficios esperados en su uso dentro de la entidad que decida instalarlo y ponerlo en operación.

5.4.2.1. Costo de diseño

El costo del biodigestor depende de las condiciones de obtención de la biomasa que se utilizará y la demanda que se necesita cubrir. El costo de diseño se verá afectado por la facilidad en la obtención de las excretas de animales que se usarán en el proceso.

5.4.3. Usos del biodigestor

Entre los principales usos de un biodigestor se anotan los siguientes:

- Producción de biogás
- Obtención de fertilizantes naturales, tanto líquidos como sólidos.
- Manejo adecuado y oportuno de residuos biodegradables, tales como efluentes humanos y animales que se envían al medio ambiente.
- Purificación de aguas residuales.
- Disminución de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera como el metano.
- Abastecimiento de fuentes energéticas alternativas para entidades.

5.5. Biogás

Es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, entre otras) y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, un ambiente anaeróbico). El producto resultante es una mezcla constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 40 y 70 % y dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación de 700 grados centígrados y su llama alcanza una temperatura de 870 grados centígrados.²⁰

El metano es el gas que se le confiere las características combustibles al biogás, ya que con un contenido de metano menor de 50 %, el biogás deja de

²⁰ ALCÍVAR GONZALEZ, Byron Fernando & FARIAS JAEN, Cristhian. *Estudio para la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica alternativo a partir de desechos biodegradables*. p. 162.

ser inflamable. El poder calorífico promedio de un metro cúbico de biogás es de cinco mil kilocalorías, lo que permite generar entre 1,3 y 1,6 kWh, lo cual equivale a medio litro de petróleo. La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables ya que produce un combustible de valor, además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico. Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras de gas, o para generar calor en hornos, estufas, secadoras, calderas u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptadas para tal efecto. Su composición aproximadamente se presenta a continuación.²¹

Tabla X. **Composición biogás**

Metano, CH ₄	40 - 70% volumen
Dióxido de carbono, CO ₂	30 – 60
Sulfuro de hidrógeno, H ₂ S	0 – 3
Hidrógeno, H ₂	0 – 1

Fuente: LAGRANGE, Bart. *Biomethane principes techniques*. p. 75.

5.5.1. Usos del biogás

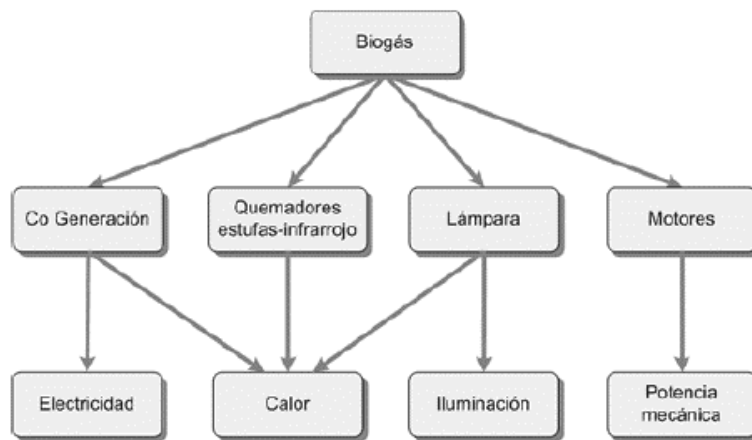
Puede ser utilizado en la finca o en el entorno urbano donde se implementa el sistema. Con el uso del biogás se puede sustituir a la electricidad, al gas propano o al diésel como fuentes energéticas en la producción de electricidad, calor o refrigeración. En el sector rural el biogás puede ser utilizado como combustible en motores de generación eléctrica para

²¹ Fuente: LAGRANGE, Bart. *Biomethane principes techniques*. p. 72.

autoconsumo de la finca o para vender a otras. Puede también usarse como combustible para hornos de aire forzado, calentadores y refrigeradores de absorción.²² Las fincas o instalaciones agropecuarias tienen la posibilidad de suplir la totalidad de sus requerimientos energéticos si se recolectan todos sus residuos orgánicos y se utilizan en la producción de biogás.

A partir del biogás se puede obtener energía eléctrica para alimentar sistema de aire acondicionado o calentamiento ambiental de uso temporal. Debido a que la producción de biogás es permanente durante todo el año, aunque no siempre constante debido a fenómenos climáticos como las estaciones, es más rentable tener instalaciones que consuman gas permanentemente que utilizarlo ocasionalmente o por cortos períodos, de otra parte, es de tener en cuenta que la conversión de aparatos al funcionamiento con gas es actualmente muy sencilla.

Figura 9. Usos del biogás



Fuente: t Fuente: LAGRANGE, Bart. *Biomethane principles techniques*. p. 78.

²² ALCÍVAR GONZALEZ, Byron Fernando & FARIAS JAEN, Cristhian. *Estudio para la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica alternativo a partir de desechos biodegradables*. p. 138.

5.5.2. Contribución del biogás en el calentamiento global

Existen tres importantes aportes de los proyectos de biogás:

- Los proyectos de generación de biogás reducen la emisión de metano a la atmósfera.
- Los proyectos de uso de biogás reemplazan el uso de energía de la red o combustibles fósiles, contribuyendo a la reducción de dióxido de carbono.
- El metano y el dióxido de carbono son dos gases de efecto invernadero que se busca reducir para disminuir el impacto del calentamiento global.

Las actividades humanas son responsables de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que aumentan considerablemente las cantidades que naturalmente existen en la atmósfera, a la que se le atribuye la responsabilidad de alterar el fenómeno natural del efecto invernadero y provocar el calentamiento global.

Los proyectos de uso de biogás utilizan dicho gas para la generación de energía renovable, sustituyendo el uso de combustibles fósiles, biomasa o el uso de la energía de la red. Dichos proyectos contribuyen a la mitigación del calentamiento global, dado que reducen el uso de fuentes de no renovables que son responsables de la emisión de gases, principalmente del dióxido de carbono.

Entre las opciones de actividades que contribuyen a la mitigación del calentamiento global, relacionadas con proyectos de biogás están:

- El mercado de carbono
- Medición de la huella de carbono y certificación del cálculo

Ambas opciones han sido creadas con el propósito de incentivar la reducción o absorción de GEI emitidos por la actividad humana y los proyectos de biogás se pueden beneficiar de ellas.

5.6. Fertilizantes naturales

Proviene de materia orgánica como restos de césped y estiércol animal. Estos fertilizantes son producidos sin productos químicos ni aditivos. El compost implica la combinación de varios tipos diferentes de materiales orgánicos juntos para hacer una gran cantidad de fertilizante oscuro, rico. Los fertilizantes naturales ayudan a mantener la calidad y el contenido de nutrientes en el suelo, lo que ayuda al crecimiento de las plantas.

5.6.1. Biosol

Se produce por la descomposición de la materia orgánica que puede ser en presencia de oxígeno (aerobia) o sin la presencia de oxígeno (anaerobia). Cuando se tiene un proceso de ciclo anaerobio también se le llama metanización o por el contrario cuando el ciclo es aerobio se le denomina compostaje.

La metanización tiene la ventaja de reducir los olores producidos por la descomposición y la carga contaminante propia de la materia orgánica. Además, por desarrollarse en un ambiente cerrado (ausencia de oxígeno) reduce el riesgo de causar enfermedades en personas y animales.²³

²³ CRESPO ASTUDILLO, Diana Marcela. *Comparación de la producción de biogás a partir de descomposición anaerobia de materia orgánica*. p. 23.

El residuo sólido resultante de la fermentación anaerobia de la materia orgánica es conocido y utilizado por su rica concentración de nutrientes como un abono orgánico.

El biosol se usa principalmente como fertilizante en procesos agrícolas, semiindustriales, cultivo de huerta (doméstico), flores, césped, entre otros. además el costo-beneficio es considerable, ya que la materia prima utilizada proviene de fuentes renovables, por lo tanto, el precio es estable y mínimo; mientras que en los fertilizantes químicos sucede lo contrario, el precio es inflacionario al provenir la materia prima de fuentes no renovables.

Otra ventaja es que el uso de estos fertilizantes asegura que los alimentos producidos estarán libres de sustancias químicas perjudiciales para la salud.

5.6.2. Foliar

El foliar es un subproducto de la descomposición anaerobia de materia orgánica, que sirve como abono natural líquido, es de color oscuro que contiene nitrógeno, fósforo y potasio que constituyen nutrientes importantes para el suelo y además es de fácil asimilación por las plantas.

- Nutre y reactiva la vida del suelo
- Fortalece la fertilidad de las plantas
- Sustituye cierta cantidad de fertilizantes químicos
- Estimula la protección de los cultivos contra el ataque de plagas

Como norma para el uso del biol se puede acotar la forma de preparación para su utilización, se debe diluir el líquido madre con una parte de agua para el

riego en los cultivos y suelos. Su beneficio es grande para que las plantas conserven su color natural y den buenos frutos.

5.7. Recomendaciones para el sistema de biodigestión

Es necesario garantizar un buen rendimiento del digestor en las instalaciones donde éste se encuentre ubicado para que cumpla con el propósito para el cual fue diseñado. Por lo cual se deben tomar en cuenta las recomendaciones que se mencionan en esta sección.

- Para que se garantice un correcto funcionamiento del digestor, los niveles de ácidos grasos volátiles dentro del mismo se han de mantener en el rango de 2 000 – 5 000 mg/L.
- También hay que llevar un cuidadoso registro del pH dentro del biodigestor, condición que debe evaluarse a diario, para garantizar que las operaciones dentro del biodigestor sean satisfactorias.
- Respecto al pH de la mezcla y del proceso se dirá que la carga de la fermentación debe estar en un rango de 7,2 – 8,2 (fase metanogénica). Cuando la carga del digestor es muy alta, el valor del pH disminuye. No está de más agregar correctores de pH a la carga inicial del digestor; bien cuando se necesita incrementarlo se puede agregar lechada de cal.

5.7.1. Limpieza

Con el fin de garantizar la pureza en el proceso de biodigestión, se debe realizar una limpieza del mismo de manera adecuada, utilizando guantes y

botas de caucho que sean de preferencia, descartables y se debe seguir los siguientes lineamientos:

Llegado el momento de hacer limpieza se recomienda el uso de un balde plástico o una bomba para vaciar el contenido del digestor. Este contenido del balde o bomba, puede ser utilizado como abono para los suelos cercanos al lugar de trabajo del biodigestor.

Las aguas de lavado deben ser retiradas por medio del uso del balde. Se lavan todas las partes del tanque que entraron en contacto con la materia prima con un cepillo de cerdas duras que no sea metálico para evitar dañar el tanque; para ello debe usarse agua abundante.

Siempre resulta útil revisar que no existen fugas en el biodigestor; y si las hubiera, se debe evaluar si es más recomendable repararlo o reemplazarlo.

5.7.1.1. Líneas de conducción

Para la adecuada limpieza de las líneas de conducción hay que tomar en cuenta los siguientes aspectos:

Inspección periódica de las líneas de conducción y cuando fuere posible ésta debe realizarse todos los días al momento de efectuar la carga, si este fuera de régimen continuo. Las partes que se recomienda inspeccionar y limpiar son la línea de gas en las uniones, válvulas, acoples y demás accesorios con el propósito de lograr la detección de fugas.

Si existen fugas se debe proceder a su reparación inmediata por medio del reemplazo de las partes que tengan defectos o por medio de sellamiento de las partes que permitan el escape con pegamento especial para dicho efecto.

Se debe realizar también un purgamiento periódico de las trampas de agua. El filtro de ácido sulfhídrico es necesario realizar una inspección anual. Si el relleno resulta estar gastado, se debe reemplazar por uno nuevo para que la trampa funcione correctamente.²⁴

5.8. Mantenimiento

Es una serie de actividades cuya ejecución permite alcanzar un mayor grado de confiabilidad en los equipos e instalaciones.

5.8.1. Plan básico de mantenimiento

Debe atenderse al mantenimiento en los puntos siguientes:

- Inspeccionar el digestor por la formación de espuma.
- Retirar la espuma abriendo el digestor si es necesario.
- Inspeccionar la impermeabilidad al agua y al gas de digestor.
- Realizar un test de presión a las válvulas, acumuladores y tuberías de gas.
- Revisar las posibles fisuras del acumulador de gas y repintarlo si es preciso.

²⁴ Unidad de Planeación Minero Energética. *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas de difusión. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás.* p. 43.

5.8.2. Control de corrosión del gasómetro

Si el gasómetro es construido de polietileno no lleva ningún tipo de tratamiento anticorrosivo; se debe implementar un control de corrosión cuando el material con el cual se ha construido sea metálico.

5.8.3. Limpieza del residuo del proceso

Después de realizado el proceso de digestión anaerobia y por ende haber obtenido una buena cantidad de biogás, es necesario realizar una limpieza, ya que el residuo de la biomasa deja de producir metano y hay que reemplazarla con otra carga de material que tenga la capacidad de nueva producción. Para ello se realiza la apertura del drenaje de salida del residuo.

5.9. Riesgos en la operación

Para que la implementación de un proyecto de producción de biogás tenga un beneficio a la comunidad donde se establezca, es necesario que la planeación de todo el proceso sea cuidadosa, desde la idea principal e instalación hasta su operación. Sin embargo, siempre existe el riesgo de tener un impacto negativo en el ambiente donde se desarrolle, estos detalles deben cuidarse para que la operación del biodigestor ofrezca los mayores beneficios posibles.

Cuando los impactos sean producto de empresas de mayor escala, se debe de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

5.9.1. Emisiones al aire

Entre los inconvenientes de la producción de metano en biodigestores, existe la posibilidad que existan fugas no detectadas en el mismo, por lo que el metano sea liberado a la atmósfera causando efecto invernadero.

También es importante tener un cuidado especial al momento de quemar el biogás debido a que puede liberarse o producirse:

- Monóxido de carbono que es nocivo para la salud de quienes entren en contacto con el biodigestor.
- Óxido de nitrógeno que es precursor de la lluvia ácida.
- Componentes orgánicos volátiles que contaminan e intoxican el aire.

5.9.2. Emisiones al suelo y cuerpos receptores de agua

Existen altas posibilidades que ocurra un daño a los cuerpos receptores de agua debido a las descargas cuando el almacenamiento no es el adecuado, cuando haya derrames del efluente o al momento de cargar la materia prima al biodigestor.

Para evitar este tipo de accidentes es necesario contar con embudos o contenedores útiles para descargar el derrame accidental o al momento de extraer una muestra para realizar análisis a nivel laboratorio.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. Variables

Parámetros dentro de la investigación que pueden adquirir o no valores dentro del mismo, cuya variación es susceptible de medirse u observarse. En este estudio por ser de carácter descriptivo, no existen variables a manipular.

6.1.1. Variable independiente

Es el conjunto de variables que tienen como característica principal el ser manipuladas y cuantificar el efecto directo sobre el proceso y su resultado. En este estudio no se manipula ningún variable.

Tabla XI. **Variables independientes del proceso**

Variable	Unidad de medida	Descripción
Materia orgánica	kg	Cantidad de materia orgánica en la carga inicial de acuerdo al régimen del biodigestor.
Tiempo de retención hidráulico	Días	Duración del proceso.

Fuente: elaboración propia.

6.1.2. Variable dependiente

Son los valores de los parámetros modificados por las variables independientes. Durante un estudio a nivel experimental, estas variables pueden ser medidas directamente o indirectamente por medio de las variables respuesta. En este estudio, estas son las variables de interés.

Tabla XII. **Variables dependientes del proceso**

Variable	Unidad de medida	Descripción
Ácidos grasos volátiles	mg CH ₃ COOH/L	Cantidad de ácido acético presente durante el proceso metanogénico.
Materia mineral o ceniza	Porcentaje [%]	Residuo del resultado de la incineración de compuestos orgánicos a 550 °C.
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	Cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla a CO ₂ y CH ₄ .
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L	Cantidad de oxígeno que las bacterias anaerobias facultativas consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra.
Coliformes fecales	NMP/100 ml	El número más probable hace referencia a la cantidad de coliformes presentes, en especial Escherichia Coli, indicador de desechos fecales.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Variables dependientes del proceso**

Volumen molar de biogás	[m ³ /mol]	Volumen de biogás generado durante el tiempo de retención hidráulico.
Concentración de metano	Prueba de combustión	Concentración máxima de metano contenido en el biogás producido.
Carbono orgánico total	mg/L	Contenido en carbono de las sustancias orgánicas disueltas y en suspensión del agua.
Nitrógeno	mg/L	Indica la cantidad de nitrógeno en el agua.
Fósforo	mg/L	Indica la cantidad de fósforo presente en el agua.
Potasio	mg/L	Indica la cantidad de potasio presente en el agua.
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	Capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones.
Temperatura ambiental	°C	Temperatura del entorno durante el proceso metanogénico en Ingenio Santa Ana.
pH	Unidad	Indica el grado de acidez del agua en una escala de 0 a 14.
Temperatura biodigestor	°C	Temperatura en el interior del reactor durante el proceso metanogénico.
Sólidos totales y volátiles	mg/L	Fracción de sólido remanente secado a 105 °C y calcinado a 550 °C.

Fuente: elaboración propia.

6.1.3. Variable respuesta

Son los parámetros que se miden al final de cada experimento como resultado de las variables independientes, los cuales no necesariamente son los parámetros de interés. A través de la medición de la variable respuesta se puede cuantificar la variable dependiente de interés. La variable dependiente coincide con la variable respuesta.

Tabla XIV. **Variables respuesta del proceso**

Variable	Unidad de medida	Descripción
Ácidos grasos volátiles	mg CH ₃ COOH/L	Analizado por epesista en Ingenio Santa Ana.
Materia mineral o ceniza	porcentaje [%]	Analizado por epesista en Ingenio Santa Ana.
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	Analizado por laboratorio de microbiología y sanitaria, Ingeniería USAC.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L	Analizado por laboratorio de microbiología y sanitaria, Ingeniería USAC.
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Analizado por laboratorio de microbiología y sanitaria, Ingeniería USAC.
Volumen molar de biogás	[m ³ /mol]	Analizado por epesista en Ingenio Santa Ana.
Concentración de metano	Prueba de combustión	Analizado por epesista en Ingenio Santa Ana.
Carbono orgánico total (COT)	mg/L	Analizado por DSG laboratorios.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Variables respuesta del proceso**

Nitrógeno	mg/L	Analizado por laboratorio de microbiología y sanitaria, Ingeniería USAC.
Fósforo	mg/L	Analizado por laboratorio de microbiología y sanitaria, Ingeniería USAC.
Potasio	mg/L	Analizado por laboratorio de Suelo, planta y agua Salvador Castillo Orellana Facultad de Agronomía, USAC.
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	Analizado por epeista en Ingenio Santa Ana.
Temperatura ambiental	°C	Analizado por epeista en Ingenio Santa Ana.
pH	unidad	Analizado por epeista en Ingenio Santa Ana.
Temperatura biodigestor	°C	Analizado por epeista en Ingenio Santa Ana.
Sólidos totales y volátiles	mg/L	Analizado por epeista en Ingenio Santa Ana.

Fuente: elaboración propia.

6.2. Delimitación del campo de estudio

Se llevó a cabo la investigación del estudio de la propuesta de implementación de un biodigestor tipo geomembrana PVC mediante la evaluación de un reactor piloto anaerobio para la producción de biogás, ubicado en km 64,5 carretera a Santa Lucía Cotzumalguapa, interior Finca Los Cerritos, Corporación Agrícola Industrial Santa Ana, durante los meses de septiembre de 2016 a mayo del 2017.

Figura 10. **Ubicación de Ingenio Santa Ana**



Fuente: Google Earth. Consulta: 08 de diciembre de 2016.

6.3. Recursos humanos disponibles

Investigadora: Paulina María Castillo Montenegro

Asesor de investigación: Marco Tulio Romero Cortez

Analistas de laboratorio: 2 personas

Corporación Agrícola Industrial Santa Ana: 5 personas

Ana:

6.4. Recursos materiales disponibles

El material utilizado para la fase experimental se describe a continuación:

- Aguas residuales provenientes de sanitarios y mingitorios de Ingenio Santa Ana
- Residuos de comida de cocinas industriales provenientes de Ingenio Santa Ana.
- Estiércol vacuno proveniente de finca.

6.4.1. Equipo

La tabla XVI describe el equipo utilizado para la toma de muestras:

Tabla XVI. **Equipo utilizado para la toma de muestras y análisis en laboratorio**

Núm	Equipo	Características
1	Casco protector	Casco industrial, resistente a golpes.
2	Guantes de latex	Utilizado para la toma de muestras y análisis en laboratorio
3	Frasco esterilizado	Utilizado para análisis microbiológico.
4	Recipiente plástico	Utilizado para análisis fisicoquímico.
5	Hielera	Utilizada para transportar las muestras hacia el laboratorio.
6	Potenciómetro	Utilizado para determinar el pH diario de muestras
7	Mascarilla para gases	Utilizada para manipular ácidos y bases para analisis de laboratorio
9	Bata de laboratorio	Utilizada para realizar analisis en laboratorio
10	Centrífuga	Utilizada para análisis en laboratorio

Fuente: elaboración propia.

6.4.2. Cristalería

Tabla XVII. **Cristalería utilizada en laboratorio**

Núm.	Cristalería
1	Cápsulas de porcelana
2	Termómetro de mercurio
3	Beackers
4	Buretas
5	Balones aforados de 1000 ml
6	Frascos esterilizados de vidrio
7	Agitador magnético
8	Recipientes de plástico

Fuente: elaboración propia.

6.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Esta investigación fue de carácter cuantitativo debido a que la información requerida se recopiló durante el proceso metanogénico, mediante la cuantificación de las variables independientes, a través de la medición de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos del biodigestor proveniente de Ingenio Santa Ana, proporcionando resultados contables para la obtención de biogás y determinar la factibilidad de la implementación de este tipo de sistema de generación de energía.

6.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para llevar a cabo la investigación se dividió en tres fases con el fin de garantizar el éxito de la misma.

6.6.1. Investigación preliminar

Inicialmente se recopiló información relacionada con el tema de investigación para la elaboración del perfil, paralelamente, se cotizó el precio de biodigestores en diferentes empresas que se dedican a la elaboración de los mismos para realizar un comparativo y analizar cuál es la opción más factible de implementar posteriormente a la evaluación del reactor anaerobio. Posteriormente se realizaron visitas de campo al restaurante Chichoy y planta Legumex para conocer acerca del uso de biodigestores a gran escala.

6.6.2. Diseño de investigación

En base a los objetivos específicos se procedió a identificar y calcular las variables independientes al biodigestor, tales como: cantidad de agua residual proveniente de las fosas sépticas, libras diarias de residuos de comida de la cocina industrial dentro del ingenio, y estiércol vacuno a tomar en cuenta para el desarrollo del mismo, los datos se obtuvieron mediante una serie de cálculos.

Teniendo en cuenta los datos principales para la carga volumétrica que se introducirá, se procedió a determinar los parámetros a considerar en el diseño del biodigestor, entre los cuales se pueden mencionar: material para construcción, volumen del reactor, tiempo de retención hidráulico, posteriormente, se realizó el cálculo del presupuesto de materiales y mano de obra para la construcción del reactor piloto y el biodigestor a implementar posteriormente a la prueba y se hizo la entrega del anteproyecto.

6.6.3. Fase experimental

La fase experimental del muestreo de la materia a utilizar se divide en dos partes, las cuales se describen a continuación.

6.6.3.1. Muestreo de estiércol vacuno y aguas residuales de baños y mingitorios

Para el desarrollo experimental se utilizará estiércol vacuno proveniente de Finca Santa María y aguas residuales de sanitarios y mingitorios provenientes de fosas sépticas de Ingenio Santa Ana.

6.6.3.2. Muestreo, acondicionamiento y preparación de la fracción orgánica

La fracción orgánica se obtuvo de los restos de comida de la cocina industrial de Ingenio Santa Ana. A continuación se mencionan las etapas de la misma.

- **Recolección:** se solicitaron por una semana los residuos generados de la cocina, productos consistentes de restos de comida por parte del personal operativo, de características variadas influidas por el tipo de comida que se sirviera el día de la recolección de la muestra.
- **Selección:** se separó la fracción orgánica de dichos residuos, dentro de la cual se eliminaron los elementos de mayor dureza como huesos y espinas.
- **Reducción de tamaño:** se cortaron los trozos grandes de residuos y se redujeron, hasta obtener un producto con tamaño uniforme en condiciones húmedas.

- Almacenamiento: se colocó la fracción orgánica en un tonel durante una semana, de donde se tomó la muestra necesaria para la alimentación al biodigestor.

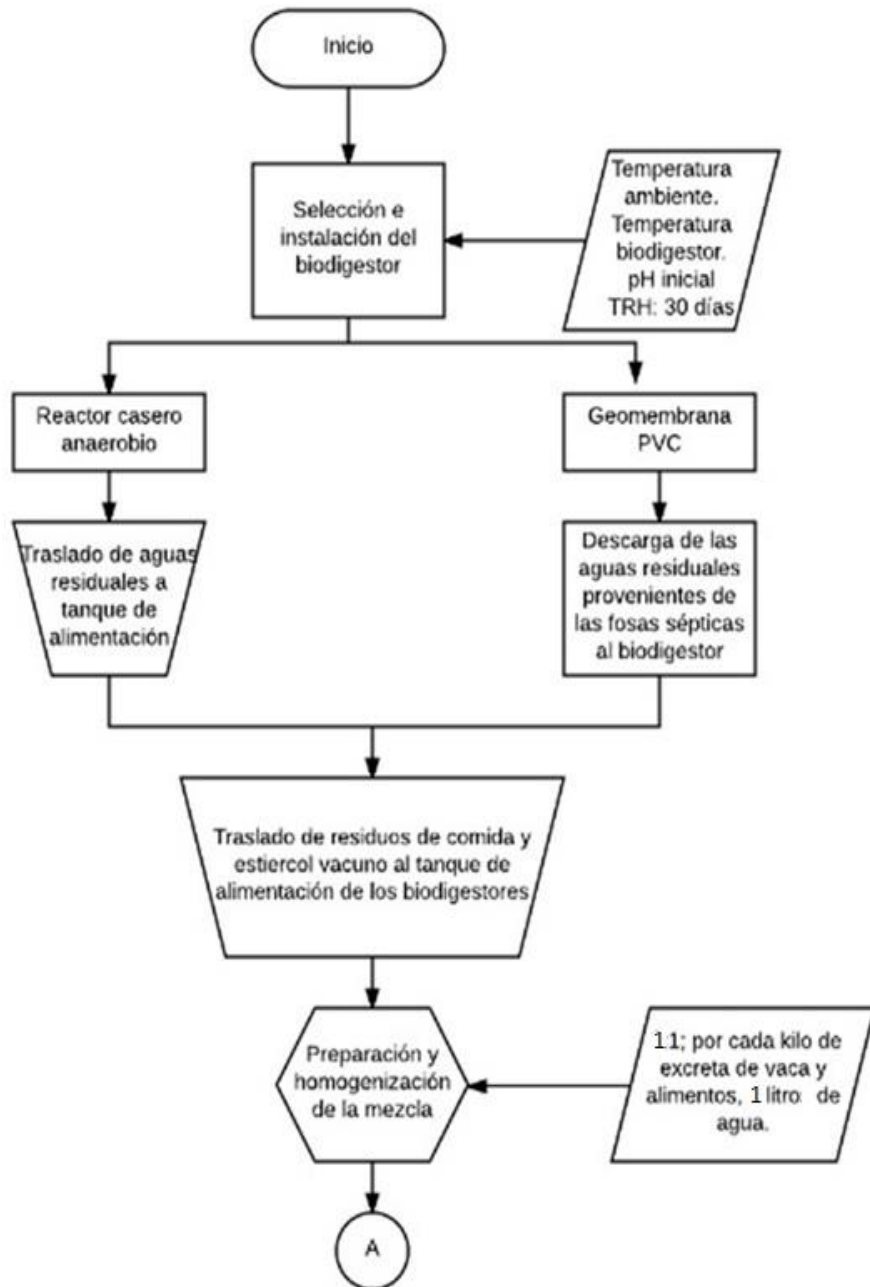
Con los datos obtenidos en la fase experimental, se procedió a la construcción del reactor anaerobio, cabe mencionar que para el reactor piloto, se utilizó un tonel de metal de 220 litros reciclado, el cual anteriormente fue utilizado para el almacenamiento de productos químicos que se utilizan a nivel operativo dentro del ingenio, y a la alimentación del mismo, ya que por ser de régimen por lotes, su carga volumétrica fue solamente una vez, se muestreó durante el proceso metanogénico una vez a la semana, el objetivo del muestreo es fue recolectar una porción pequeña de la carga para que pudiera ser manejada y analizada a nivel laboratorio para la obtención de resultados representativos de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos afluentes y efluentes y la cantidad de metros cúbicos de biogás producido durante el proceso metanogénico.

Una vez concluido el tiempo de digestión se evaluó la calidad en el biogás producido, asimismo, a partir de los análisis fisicoquímicos al bioabono resultante se determinó si poseía riqueza nutritiva para implementarlo en los campos de cultivo de semilla de caña.

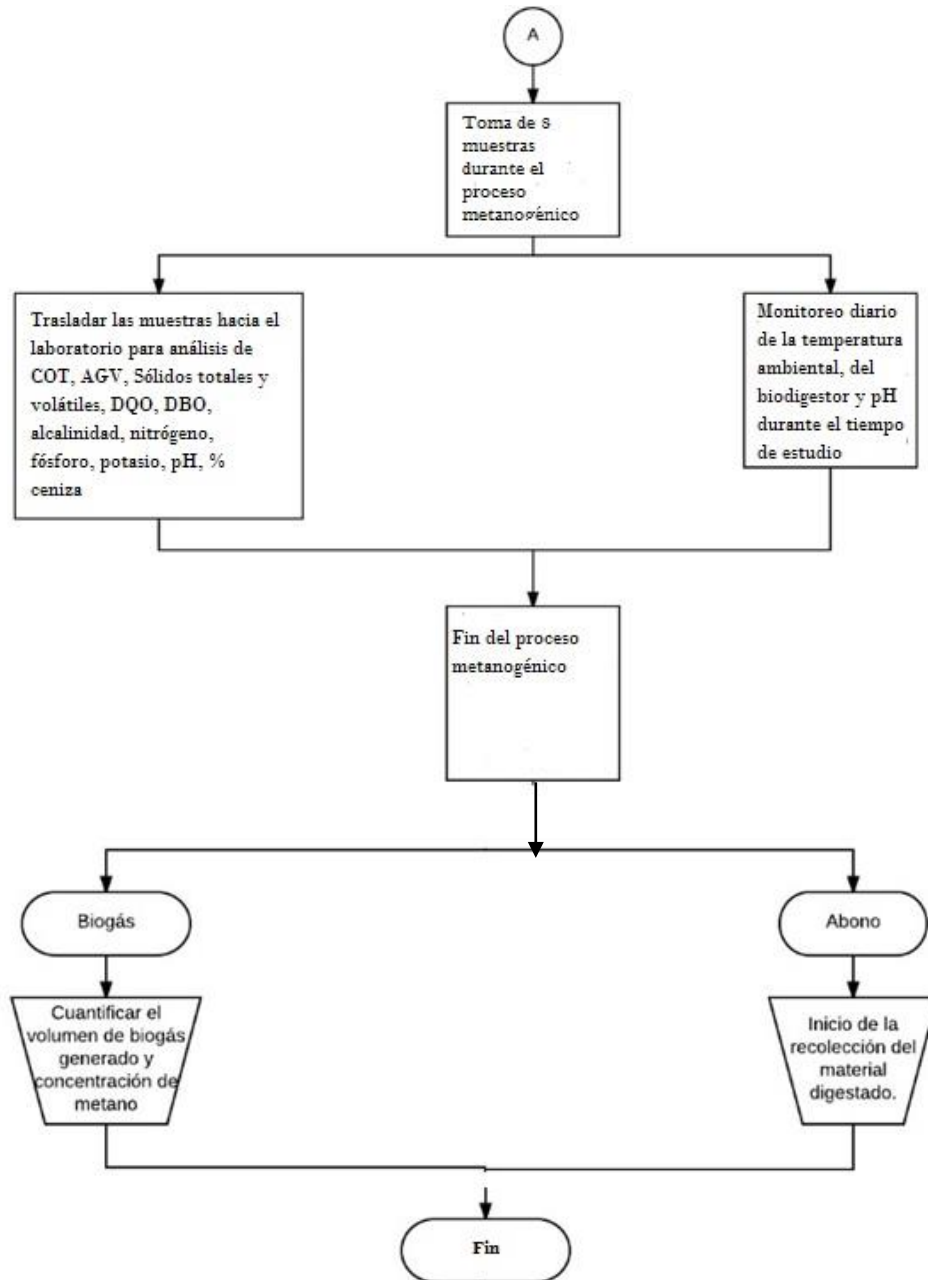
Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos fueron analizados por el Laboratorio de Microbiología y Sanitaria Dra. Alba Tabarini, de la facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, DSG Laboratorios y Laboratorio de Suelo, Planta y Agua Salvador Castillo Orellana de la facultad de agronomía.

6.6.3.3. Diagrama de flujo del procedimiento de producción de biogás

Figura 11. Producción de biogás



Continuación de la figura 11.



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2015.

6.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los formatos utilizados para la tabulación y procesamiento de los datos se realizaron de acuerdo a sus características físicas, químicas y microbiológicas respecto al tiempo de digestión anaerobia.

Tabla XVIII. **Propiedades fisicoquímicas de aguas residuales de biodigestor**

	Propiedades fisicoquímicas				
	Muestra	Temperatura ambiental [°C]	Temperatura biodigestor [°C]	Ceniza [%]	pH
Lote 1	1	TA ₁	TB ₁	C ₁	U ₁
	2	TA ₂	TB ₂	C ₂	U ₂
	3	TA ₃	TB ₃	C ₃	U ₃
	4	TA ₄	TB ₄	C ₄	U ₄
Lote 2	5	TA ₅	TB ₅	C ₅	U ₅
	6	TA ₆	TB ₆	C ₆	U ₆
	7	TA ₇	TB ₇	C ₇	U ₇
	8	TA ₈	TB ₈	C ₈	U ₈

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Propiedades químicas de aguas residuales de biodigestor**

	Propiedades químicas				
	Muestra	Ácidos grasos volátiles [mg CH ₃ COOH/L]	DQO [mg/L]	DBO [mg/L]	Nitrógeno total [mg/L]
Lote 1	1	AGV ₁	DQO ₁	DBO ₁	N ₁
	2	AGV ₂	DQO ₂	DBO ₂	N ₂
	3	AGV ₃	DQO ₃	DBO ₃	N ₃
	4	AGV ₄	DQO ₄	DBO ₄	N ₄
Lote 2	5	AGV ₅	DQO ₅	DBO ₅	N ₅
	6	AGV ₆	DQO ₆	DBO ₆	N ₆
	7	AGV ₇	DQO ₇	DBO ₇	N ₇
	8	AGV ₈	DQO ₈	DBO ₈	N ₈

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Propiedades químicas de aguas residuales de biodigestor**

	Propiedades químicas				
	Muestra	Carbono orgánico total [mg/L]	Fósforo [mg/L]	Potasio [mg/L]	Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]
Lote 1	1	COT ₁	P ₁	K ₁	A ₁
	2	COT ₂	P ₂	K ₂	A ₂
	3	COT ₃	P ₃	K ₃	A ₃
	4	COT ₄	P ₄	K ₄	A ₄
Lote 2	5	COT ₅	P ₅	K ₅	A ₅
	6	COT ₆	P ₆	K ₆	A ₆
	7	COT ₇	P ₇	K ₇	A ₇
	8	COT ₈	P ₈	K ₈	A ₈

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Propiedades químicas de aguas residuales de biodigestor**

	Propiedades químicas		
	Muestra	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos volátiles (mg/L)
Lote 1	1	ST ₁	SV ₁
	2	ST ₂	SV ₂
	3	ST ₃	SV ₃
	4	ST ₄	SV ₄
Lote 2	5	ST ₅	SV ₅
	6	ST ₆	SV ₆
	7	ST ₇	SV ₇
	8	ST ₈	SV ₈

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Propiedades microbiológicas de aguas residuales de biodigestor**

Propiedades microbiológicas de aguas residuales		
	Muestra	Coliformes fecales (NMP/100 ml)
Lote 1	1	CF ₁
	2	CF ₂
	3	CF ₃
	4	CF ₄
Lote 2	5	CF ₅
	6	CF ₆
	7	CF ₇
	8	CF ₈

Fuente: elaboración propia.

6.7.1. Procesamiento de la información en la determinación de parámetros operacionales

- Reactor anaerobio

Se tomó en cuenta para el correcto funcionamiento del reactor piloto los siguientes parámetros operacionales:

El tiempo de retención hidráulico y la temperatura se seleccionaron de acuerdo a las recomendaciones de la bibliografía, el volumen total del biodigestor se determinó debido a la disponibilidad de un tanque que poseía el ingenio, a partir de estos datos se consideró también el volumen de sólidos a procesar.

6.7.1.1. Cálculo del volumen de biodigestor

De acuerdo al volumen total del digestor se calculó el volumen funcional del biodigestor a partir de la siguiente fórmula:

$$V_f = V_t * 0,75 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

V_f = Volumen funcional

V_t = Volumen total

Así:

$$V_f = 220 \text{ L} * 0,75$$

$$V_f = 165 \text{ L}$$

- Cálculo del volumen inicial: por trabajarse en régimen por lotes, el volumen que se ingresará durante el único lote de carga será igual al volumen funcional.
- Cálculo de la carga inicial del sustrato e inóculo: se utilizó como material de carga, aguas residuales provenientes de sanitarios y mingitorios, residuos de cocinas industriales y heces bovinas, en los cuales se determinó la relación carbono/nitrógeno mediante los análisis químicos de las muestras.

6.7.1.2. Balances de masa

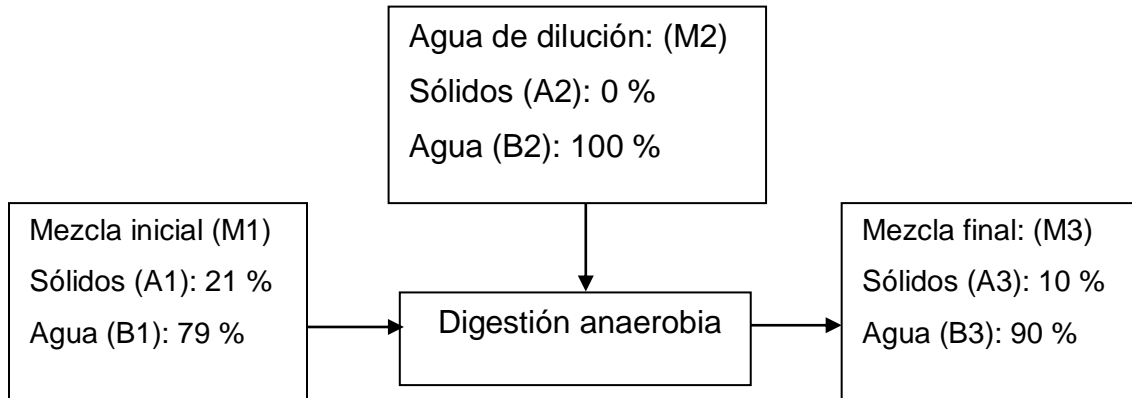
Experimentalmente se ha demostrado que una carga en biodigestores de régimen por lotes no debe tener más de un 8 a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso. Para obtener un cálculo del total de agua a agregar, primero se debe calcular el contenido de sólidos totales de la mezcla:

$$\%ST = \sum_{i=1}^n \frac{(\text{kg residuo})(\%ST \text{ residuo})}{\text{Kg total de residuos}} * 100 \quad \text{Ec. 2}$$

$$\%ST = \frac{(45 \text{ kg})(0,177) + (45\text{kg})(0,242)}{90 \text{ kg}} * 100 = 21 \%$$

Este resultado indica que en 100 kg de mezcla se tiene 21 kg de materia seca y 79 litros de agua. Mediante un balance de masas se puede identificar la cantidad de agua agregar. Se realiza el cálculo para llevar 1 kg de residuos con estas características al 10 % de ST:

Figura 12. Diagrama de balance de masas



Fuente: elaboración propia.

Las ecuaciones del balance de masa son las siguientes:

Mezcla: $M_1 + M_2 = M_3$, tomando como referencia $M_1 = 1\text{kg}$,
 $1\text{kg} + M_2 = M_3$ (Ec. 3)

Agua: $M_1 \cdot B_1 + M_2 \cdot B_2 = M_3 \cdot B_3$ →
 $1\text{kg} (0,79) + M_2 \cdot B_2 = M_3 \cdot B_3$ (Ec. 4)

Sólidos: $M_1 \cdot A_1 = M_2 \cdot A_2 + M_3 \cdot A_3$
 $(1\text{kg})(0,21) + M_2 \cdot (0) = M_3 (0,10)$ (Ec. 5)

De la ecuación 5 se obtiene que

$$M_3 = \frac{(1\text{kg})(0,21)}{(0,10)} = 2,1 \text{ kg}$$

Reemplazando este valor en (3)

$$M_2 = 2,1 - 1\text{kg} = 1,1 \text{ Kg}$$

Del balance de masas se obtiene que, por cada kilogramo de residuos, es necesario agregar 1,1 litros de agua

$$\text{Litros de agua} = 1,1 \frac{\text{L}}{\text{kg residuo}} * 90 \text{ kg} = 99 \text{ litros de agua}$$

6.7.1.3. Relación carbono/nitrógeno (C/N)

Para obtener la relación C/N se utilizó la disponibilidad de 100 litros de aguas residuales y 45 kg de residuos de comida y heces bovinas.

Para el cálculo de la relación carbono nitrógeno se utilizó la siguiente fórmula, cabe destacar que el porcentaje de carbono y nitrógeno para el agua residual, estiércol bovino y aguas residuales fueron consultados en fuentes bibliográficas.

$$\frac{C}{N} = \frac{(\%Ca)(Qa) + (\%Cr)(Qr) + (\%Ch)(Qh)}{(\%Na)(Qa) + (\%Nr)(Qr) + (\%Nh)(Qh)} \quad \text{Ec. 6 (FAO, 2011)}$$

Donde:

C/N = relación carbono/nitrógeno

Ca = porcentaje de carbono en el agua residual

Na = porcentaje de nitrógeno en el agua residual

Cr = porcentaje de carbono de los residuos de comida

Nr = porcentaje de nitrógeno de los residuos de comida

Ch = porcentaje de carbono en heces bovinas

Nh = porcentaje de nitrógeno en heces bovinas

Qa = peso de las aguas residuales en L

Qr = peso de los residuos de cocina en kg

Qh = peso de las heces bovinas en kg

$$\frac{C}{N} = \frac{(100L)(2,5) + (45 \text{ kg})(44) + (45\text{kg})(29)}{(0,8)(100L) + (1,15)(45\text{kg}) + (0,06)(45\text{kg})}$$

$$\frac{C}{N}: 26,29$$

6.7.1.4. pH

Se midió el pH diariamente a cada lote del reactor anaerobio durante el tiempo de retención hidráulico.

6.7.1.5. Temperatura biodigestor

La temperatura del lodo interno del biodigestor se determinó por medio de una termocupla, con una capacidad térmica para permitir un equilibrio rápido.

6.7.1.6. Sólidos totales

Se secó la cápsula de porcelana durante 15 minutos a 550 °C, posteriormente se introdujo en un desecador, enfrió y pesó hasta peso constante (P_o, mg).

Se midió 50 ml de muestra. Se secó la muestra en la estufa a 100 °C durante 24 horas, se introdujo en un desecador, dejó enfriarse y se pesó nuevamente (P₁, mg).

$$\text{Sólidos totales} = \frac{P_1 - P_0}{V} \quad \text{Ec. 7}$$

6.7.1.7. Sólidos volátiles

La cápsula que contenía la muestra seca a 100 °C se introdujo en un horno mufla durante 15 horas a 550 °C. Se colocó en un desecador, se enfrió y pesó (P_2 , mg).

$$\text{Sólidos volátiles} = \frac{P_1 - P_2}{V} \quad \text{Ec. 8}$$

6.7.1.8. Ácidos grasos volátiles / alcalinidad

Esta técnica requirió un pretratamiento de la muestra para la reducción de sólidos, para lo cual se midieron dos alícuotas de 25-50 ml de muestra, se centrifugó a 5 000 rpm durante 10 minutos. Se recogió el sobrenadante. Se centrifugaron de nuevo y se volvió a recoger el sobrenadante. Posteriormente se midió el pH de las muestras centrifugadas. El primer sobrenadante obtenido se valoró con ácido sulfúrico 0,1 N, hasta un pH entre el rango de 3,5 – 3,3. El volumen de ácido usado (V_1 , ml) representa la alcalinidad total de la muestra.

$$\text{Alcalinidad total} \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} = \frac{V_{1\text{H}_2\text{SO}_4} * 50 * 1\,000}{\text{mL de muestra}} \quad \text{Ec. 9}$$

Posteriormente el segundo sobrenadante obtenido, se tituló con hidróxido de sodio 0,1 N hasta un pH 7. El volumen de hidróxido de sodio utilizado (V_2 , ml) representa la acidez volátil de la muestra.

$$\text{Ácidos grasos volátiles} \frac{\text{mgCH}_3\text{COOH}}{\text{L}} = \frac{V_{2\text{NaOH}} * 60 * 1\,000}{\text{mL de muestra}} \quad \text{Ec. 10}$$

6.7.1.9. Determinación de material mineral o ceniza

Se introdujo un crisol a la estufa a una temperatura de 100 °C durante 20 minutos, se retiró el crisol y se transfirió al desecador por 3 minutos, se pesó.

Posteriormente se pesaron 2 gramos de la muestra en el crisol, se llevó a la mufla para calcinar durante 8 horas precalentada entre 550 – 600 °C. Finalmente, se enfrió el crisol en el desecador por 3 minutos, pesó y calculó el porcentaje de cenizas.

$$\% \text{ ceniza} = \frac{(\text{peso de crisol con muestra seca} - \text{peso crisol vacío})}{(\text{peso de crisol con muestra fresca} - \text{peso crisol vacío})} (100) \quad \text{Ec. 11}$$

6.7.1.10. Volumen experimental de gas metano

Se determinó el volumen de gas metano producido durante el tiempo de retención hidráulico para ambos lotes, se monitoreó la presión y temperatura producida en el biodigestor para cada día, los datos fueron tomados a las 12:00 horas del medio día de cada día, donde la transferencia de calor por radiación del sol era máxima.

El metano al ser una molécula simétrica se adaptó a la ecuación del primer virial en función de la correlación de Lee Kesler para determinar el factor de compresibilidad y finalmente calcular su volumen molar utilizando la ecuación del gas ideal modificada.

6.7.1.10.1. Cálculo de presión y temperatura reducida

Se calcularon las propiedades relativas del metano a partir de la presión y temperatura de trabajo, así como de la temperatura y presión crítica del mismo para cada día durante el tiempo de retención hidráulico para ambos lotes, los valores críticos fueron obtenidos del apéndice B, tabla B1: propiedades de especies puras.

$$Tr = \frac{T}{T_c} \quad \text{Ec. 12}$$

$$Pr = \frac{P}{P_c} \quad \text{Ec. 13}$$

6.7.1.10.2. Factor acéntrico

Este parámetro fue consultado en el apéndice B, tabla B1: propiedades de especies puras.

6.7.1.10.3. Coeficientes viriales

Los coeficientes B^0 y B^1 son funciones exclusivamente de la temperatura reducida, provienen de la ecuación virial truncada en el segundo coeficiente (Pitzer-Curl) para presiones bajas menores a 4 bar, están representados mediante las siguientes ecuaciones.

$$B^0 = 0,083 - \frac{0,422}{Tr^{1,6}} \quad \text{Ec. 14}$$

$$B^1 = 0,139 \frac{0,172}{Tr^{4,2}} \quad \text{Ec. 15}$$

6.7.1.10.4. Factor de compresibilidad

Teniendo los valores de los coeficientes B^0 y B^1 , se procedió a sustituirlos en la correlación generalizada de Lee Kesler para determinar Z^0 y Z^1 en función de la temperatura reducida y presión reducida:

$$Z^0 = 1 + B^0 * \frac{Pr}{Tr} \quad \text{Ec. 16}$$

$$Z^1 = B^1 * \frac{Pr}{Tr} \quad \text{Ec. 17}$$

Posteriormente teniendo los valores de Z^0 , Z^1 y el factor acentrico (ω) obtenido de las tablas de especies puras, se adaptó a la correlación desarrollada por Lee-Kesler:

$$Z = Z^0 + \omega Z^1 \quad \text{Ec. 18}$$

6.7.1.10.5. Volumen molar

A partir del factor de compresibilidad calculado, este factor se establece como una relación entre el volumen del gas real y el volumen de gas ideal y se emplea para corregir las desviaciones de la idealidad, se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{ZRT}{P} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

$R = 8,31451$, constante universal de los gases ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{mol} \cdot \text{K}$)

T= temperatura de trabajo (°K)

P= presión de trabajo (Pa)

V= volumen molar (m³/mol)

6.7.1.11. Producción teórica de gas metano

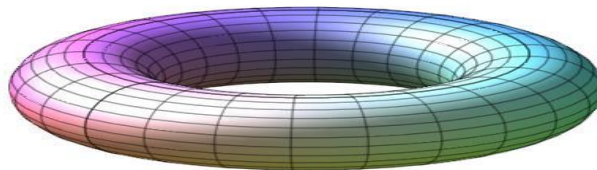
El biogás generado durante el proceso metanogénico se almacenó en un tubo de llanta reciclado, por lo que se sabe que el volumen que adaptó fue el de un toroide:

$$V_{\text{CH}_4 \text{ teórico}}: 2\pi^2 Rr^2 \quad \text{Ec. 20 (Acosta, 2011)}$$

$$V_{\text{CH}_4 \text{ teórico}}: 2\pi^2 (0,4794\text{m})(0,2562\text{m})^2$$

$$V_{\text{CH}_4 \text{ teórico}}: 0,6211 \text{ m}^3$$

Figura 13. Reservorio



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2015.

6.7.1.12. Eficiencia de biodigestor

La eficiencia del biodigestor se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{V_{\text{CH}_4 \text{ teórico}} - V_{\text{experimental}}}{V_{\text{teórico}}} * 100 \quad \text{Ec. 21 (Acosta, 2011)}$$

Donde:

$$V_{\text{CH}_4 \text{ teórico}} = 0,6211 \text{ m}^3$$

$V_{\text{CH}_4 \text{ experimental}}$ = volumen promedio calculado mediante la ecuación del primer virial durante el proceso metanogénico $\rightarrow 0,0764 \text{ m}^3$

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{0,6211 \text{ m}^3 - 0,0764 \text{ m}^3}{0,6211 \text{ m}^3} * 100 = 87,70 \%$$

6.7.1.13. Capacidad calorífica del metano

Utilizando los coeficientes del metano de la tabla B.12 capacidades caloríficas se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{C_p^{gi}}{R} = \int_{T_o}^{T_f} a + bT + cT^2 + dT^3 \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

$$a = 0,01987$$

$$b = 5,021 \times 10^{-5}$$

$$c = 1,268 \times 10^{-8}$$

$$d = -11,00 \times 10^{-12}$$

T_o = temperatura ambiente 298,15

T_f = temperatura máxima alcanzada por el biodigestor en los dos lotes

Primer lote:

$$\frac{C_p^{gi}}{R} = \int_{298,15}^{314,15} 0,01987 + 5,021 \times 10^{-5} X + 1,268 \times 10^{-8} X^2 - 11,0 \times 10^{-12} X^3$$

$$\frac{C_p^{gi}}{R} = 0,5778$$

$$C_p^{gi} = (0,5778)(8,31451)$$

$$C_p = 4,8041 \frac{\text{KJ}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}}$$

Segundo lote:

$$\frac{C_p^{gi}}{R} = \int_{298,15}^{316,15} 0,01987 + 5,021 \times 10^{-5} X + 1,268 \times 10^{-8} X^2 - 11,0 \times 10^{-12} X^3$$

$$\frac{C_p^{gi}}{R} = 0,6511$$

$$C_p^{gi} = (0,6511)(8,31451)$$

$$C_p = 5,4136 \frac{\text{KJ}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}}$$

6.7.1.14. Entalpía

A partir del cálculo de la capacidad calorífica del metano a presión constante se calcula la entalpía del sistema para cada lote mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta H = \int_{T_o}^{T_f} C_p dT \quad \text{Ec. 23}$$

Primer lote:

$$\Delta H = \int_{298,15}^{314,15} 4,8041$$

$$\Delta H = 76,8656 \text{ KJ/mol}$$

Segundo lote:

$$\Delta H = \int_{298,15}^{316,15} 5,4136$$

$$\Delta H = 97,448 \text{ KJ/mol}$$

6.7.1.15. Balance de energía

Para determinar el balance de energía, por ser un sistema que trabaja en régimen por lote se determinó mediante la siguiente ecuación

$$\Delta H = Q$$

$$Q = \dot{m} * \Delta H \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

\dot{m} : flujo másico(mol/lote) se convirtieron los 165 litros/lote a mol/lote

ΔH : entalpía (KJ/mol)

Por ser un sistema a presión constante, la entalpía fue calculada en función de la capacidad calorífica para ambos lotes en el paso anterior, por lo tanto, se procede a calcular el calor en el proceso

Primer lote:

$$Q = \dot{m} * \Delta H$$
$$Q = \left(\frac{165L}{\text{batch}}\right) * \left(\frac{1 \text{ mol}}{22,4L}\right) * \left(\frac{76,8656KJ}{\text{mol}}\right) = 566,20 \text{ KJ/batch}$$

Segundo lote:

$$Q = \dot{m} * \Delta H$$
$$Q = \left(\frac{165L}{\text{batch}}\right) * \left(\frac{1 \text{ mol}}{22,4L}\right) * \left(\frac{97,448KJ}{\text{mol}}\right) = 717,81 \text{ KJ/batch}$$

6.7.1.16. Transferencia de calor por radiación

La cantidad de energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura y de la naturaleza de la superficie, un cuerpo negro emite una cantidad de energía radiante de su superficie dada por la ecuación:

$$Q_r = \varepsilon * \sigma * A * (T_c^4 - T_f^4) \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

ε = emisividad del cuerpo negro

σ = constante de Boltzman, $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

T_c = temperatura del biodigestor en ($^{\circ}\text{K}$)

T_f = temperatura ambiental ($^{\circ}\text{K}$)

A = área superficial del cuerpo negro, en este caso como es un cilindro, se calcula el área superficial total en m^2

Radio = 0,30 m

Altura = 1 m

$$A_{\text{cilindro}} = 2\pi r(r + h) \text{ Ec. 26}$$

$$A_{\text{cilindro}} = 2\pi(0,30\text{m})(0,30\text{m} + 1\text{m})$$

$$A_{\text{cilindro}} = 2,4504 \text{ m}^2$$

Lote 1:

$$Q_r = \varepsilon * \sigma * A * (T_c^4 - T_f^4)$$

$$Q_r = (0,8) * (5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{J}}{\text{s} * \text{m}^2 * \text{K}^4}) * (2,4504 \text{ m}^2) * (310 \text{ }^\circ\text{K}^4 - 308,22 \text{ }^\circ\text{K}^4)$$

$$Q_r = 23,37 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Calor de radiación por día

$$\frac{23,37 \text{ J}}{\text{s}} * \frac{86\,400 \text{ s}}{1 \text{ día}} = 2\,019,51 \frac{\text{KJ}}{\text{día}}$$

Calor de radiación promedio durante tiempo de retención hidráulico

$$\frac{2\,019,51 \text{ J}}{\text{día}} * 30 \text{ días} = 60\,585,37 \text{ KJ}$$

Lote 2:

$$Q_r = \varepsilon * \sigma * A * (T_c^4 - T_f^4)$$

$$Q_r = (0,8) * (5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{J}}{\text{s} * \text{m}^2 * \text{K}^4}) * (2,4504 \text{ m}^2) * (311 \text{ }^\circ\text{K}^4 - 308,12 \text{ }^\circ\text{K}^4)$$

$$Q_r = 37,98 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Calor de radiación por día

$$\frac{37,98 \text{ J}}{\text{s}} * \frac{86\,400 \text{ s}}{1 \text{ día}} = 3\,281,47 \frac{\text{KJ}}{\text{día}}$$

Calor de radiación promedio durante tiempo de retención hidráulico

$$\frac{3\,281,47\text{ J}}{\text{día}} * 30\text{ días} = 98\,444,16\text{ KJ}$$

6.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con base en la diferencia entre el resultado obtenido de los análisis realizados a cada una de las muestras tomadas para el lote 1 y el lote 2. Se utilizó el estadístico T de la distribución *t de student*, para un número de muestras menor a 30; para un número mayor de muestras se utilizó el estadístico Z correspondiente a una distribución normal.

Tabla XXIII. **Diferencia de medias de muestras emparejadas para estadístico t**

Parámetro de medición	Media lote 1	Media lote 2	Desviación estándar lote 1	Desviación estándar lote 2
AGV	780	740	1 314,70	1 177,76
Ceniza	5,74	6,41	1,44	1,11
DQO	3 765	3 900	2 435,19	2 395,62
DBO	3 365	3 214	2 436,82	2 373,52
Nitrógeno	3 909	3 895	2 304,01	2 330,85
COT	76 384	70 540	55 804,72	49 648,80
Potasio	3 294	4 036	1 903,74	1 898,94
Alcalinidad	9 567	9 533	1 709,09	1 563,08
Sólidos volátiles	256 911	262 333	129 707,28	129 405,40
Sólidos totales	275 667	280 475	135 435,84	135 646,19
Relación C/N	17,59	16,81	4,35	3,13
Fósforo	612,25	519,25	388	408
Coliformes fecales	4 250	3 730	2 719	2 360

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Diferencia de medias de muestras emparejadas para estadístico Z**

Parámetro de medición	Media lote 1	Media lote 2	Varianza lote 1	Varianza lote 2
pH	7,22	7,24	0,50	0,43
Temperatura ambiental	35	35	1	1
Temperatura biodigestor	37	37	2	2
Volumen de gas metano	0,0764	0,0889	0,0186	0,0203

Fuente: elaboración propia.

6.8.1. Comprobación de hipótesis mediante t de student para n = 10

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

n_1 = total de muestras lote 1

s_1 = desviación estándar lote 1

n_2 = total de muestras lote 2

s_2 = desviación estándar lote 2

gl = grados de libertad, 18

Valor crítico de t (dos colas) = 2,101

Valor crítico de t (una cola) = 1,734

x_1 = media lote 1

x_2 = media lote 2

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n_1} + \frac{S_p^2}{n_2}}} \quad \text{Ec. 28}$$

6.8.2. Comprobación de hipótesis mediante t de student n = 6

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

n_1 = total de muestras lote 1

s_1 = desviación estándar lote 1

n_2 = total de muestras lote 2

s_2 = desviación estándar lote 2

gl = grados de libertad, 10

Valor crítico de t (dos colas) = 2,2281

Valor crítico de t (una cola) = 1,812

x_1 = media lote 1

x_2 = media lote 2

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n_1} + \frac{S_p^2}{n_2}}}$$

6.8.3. Comprobación de hipótesis mediante t de student n = 4

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

n_1 = total de muestras lote 1

s_1 = desviación estándar lote 1

n_2 = total de muestras lote 2

s_2 = desviación estándar lote 2

gl = grados de libertad, 6

Valor crítico de t (dos colas) = 2,4469

Valor crítico de t (una cola) = 1,932

x_1 = media lote 1

x_2 = media lote 2

$$t = \frac{(X_1 - X_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n_1} + \frac{S_p^2}{n_2}}}$$

6.8.4. Comprobación de hipótesis mediante estadístico z para n = 30

Donde:

X_1 = media lote 1

X_2 = media lote 2

n_1 = total de muestras lote 1

n_2 = total de muestras lote 2

$\mu_1 - \mu_2 = 0$

$\alpha = 0,05$, para un nivel de confianza del 95 %

$z = \pm 1,96$

$$z = \frac{(X_1 - X_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad \text{Ec. 29}$$

Tabla XXV. **Comprobación de hipótesis t de student para n = 10**

Parámetro	t calculada	t crítica	Criterio de aceptación	Conclusión
AGV	0,072	$\pm 2,101$	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Alcalinidad	0,046	$\pm 2,101$	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Comprobación de hipótesis t de student para n = 4**

Parámetro	t calculada	t crítica	Criterio de aceptación	Conclusión
DQO	-0,079	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
DBO	0,089	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Nitrógeno	0,0085	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
COT	0,156	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Potasio	-0,744	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Relación C/N	0,291	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Fósforo	0,33	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Coliformes fecales	0,289	± 2,4469	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Comprobación de hipótesis t de student para n = 6**

Parámetro	t calculada	t crítica	Criterio de aceptación	Conclusión
Ceniza	-0,903	$\pm 2,2281$	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Sólidos totales	-0,061	$\pm 2,2281$	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Sólidos volátiles	-0,073	$\pm 2,2281$	t calculada < t crítica	Se acepta hipótesis nula
Sólidos fijos	0,027	$\pm 2,2281$	t Calculada < t Crítica	Se acepta hipótesis nula

Fuente: elaboración propia.

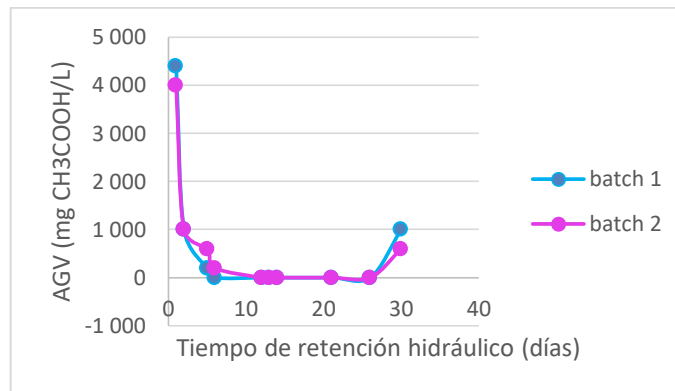
Tabla XXVIII. **Comprobación de hipótesis estadístico z para n = 30**

Parámetro	z calculado	z crítico	Criterio de aceptación	Conclusión
pH	-0,166	$\pm 1,96$	z calculado < z crítico	Se acepta hipótesis nula
Temperatura ambiental	0	$\pm 1,96$	z calculado < z crítico	Se acepta hipótesis nula
Temperatura biodigestor	0	$\pm 1,96$	z calculado < z crítico	Se acepta hipótesis nula
Volumen gas metano	-2,49	$\pm 1,96$	z calculado < z crítico	Se acepta hipótesis alternativa

Fuente: elaboración propia.

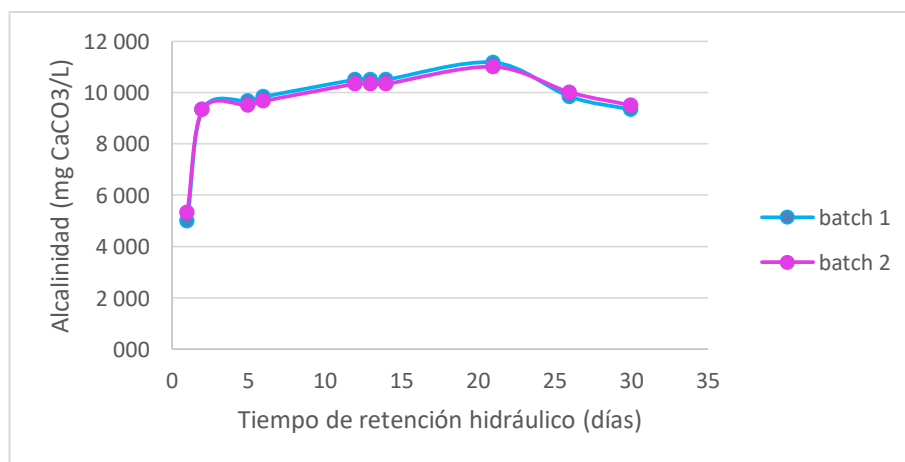
7. RESULTADOS

Figura 14. **Ácidos grasos volátiles**



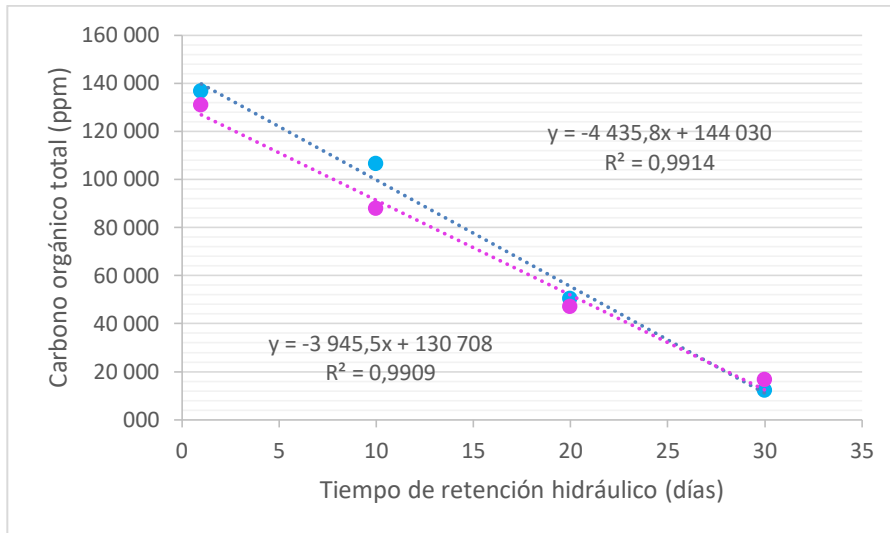
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Alcalinidad**



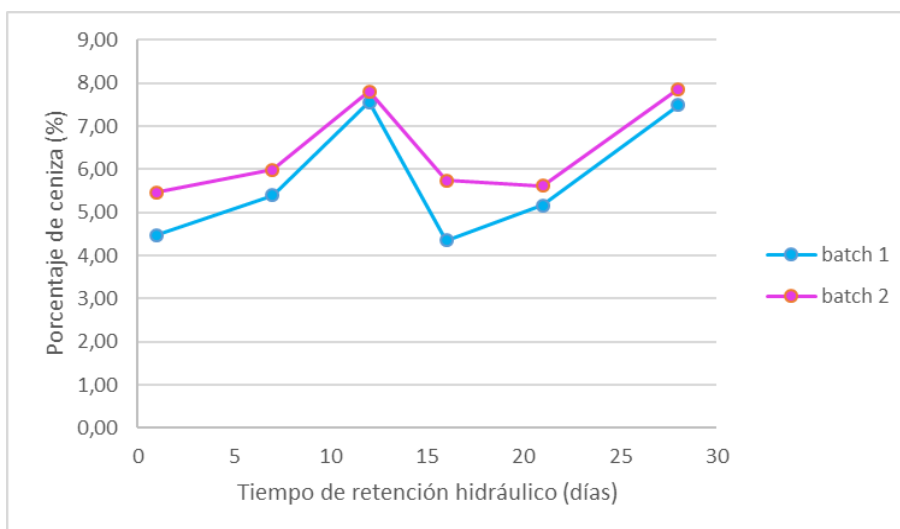
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Carbono orgánico total**



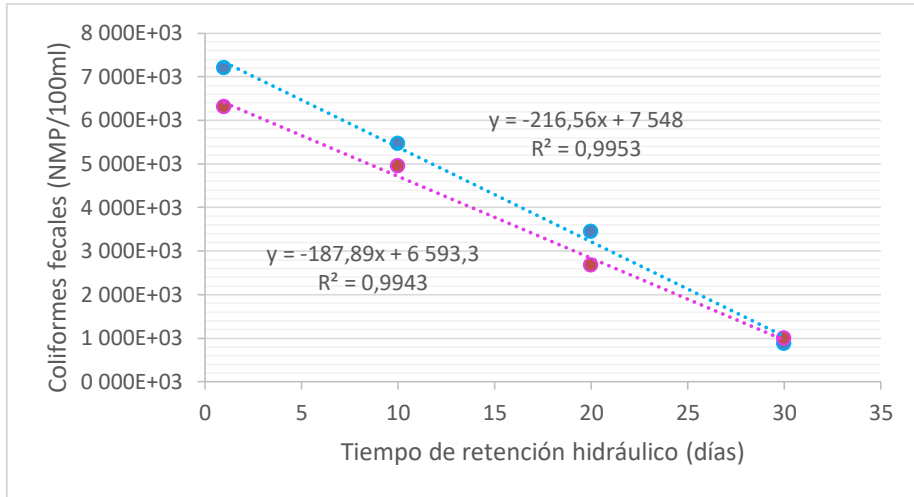
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Ceniza**



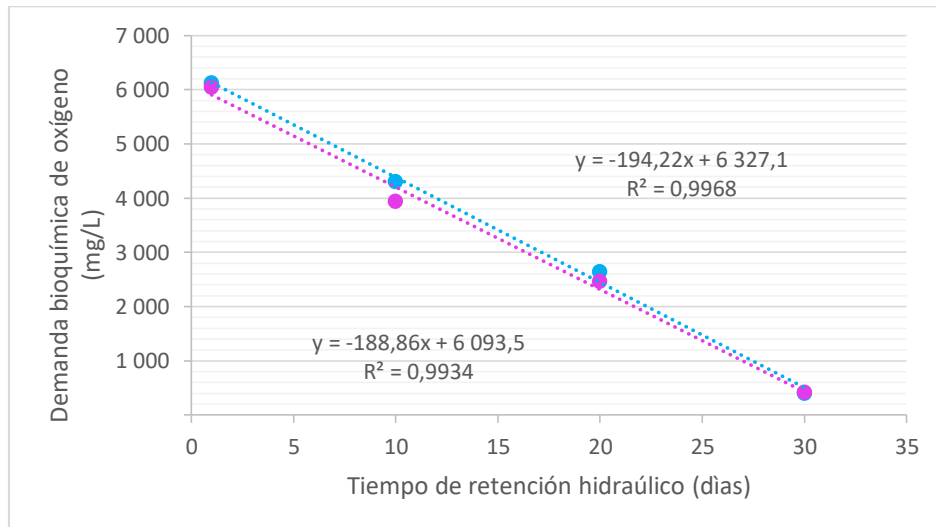
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Coliformes fecales**



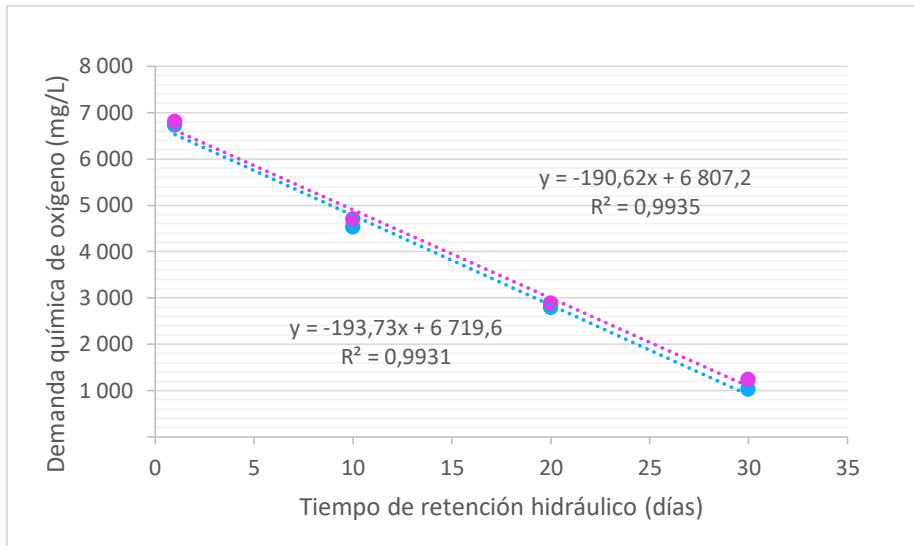
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Demanda bioquímica de oxígeno**



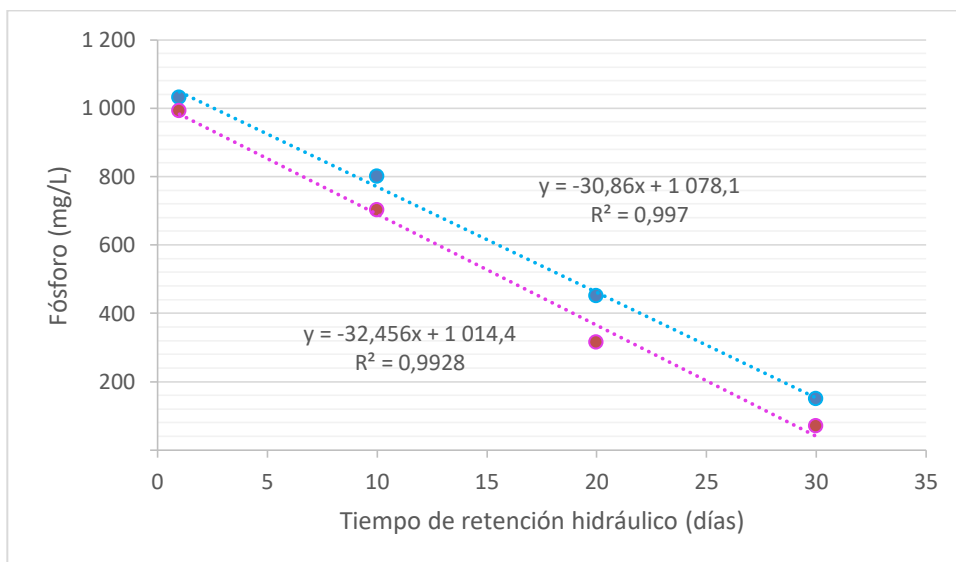
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Demanda química de oxígeno**



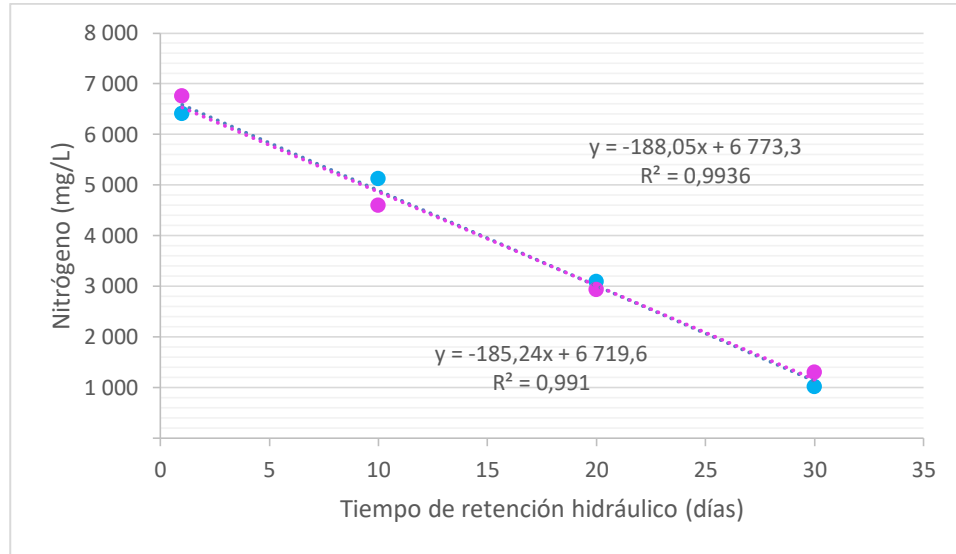
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Fósforo**



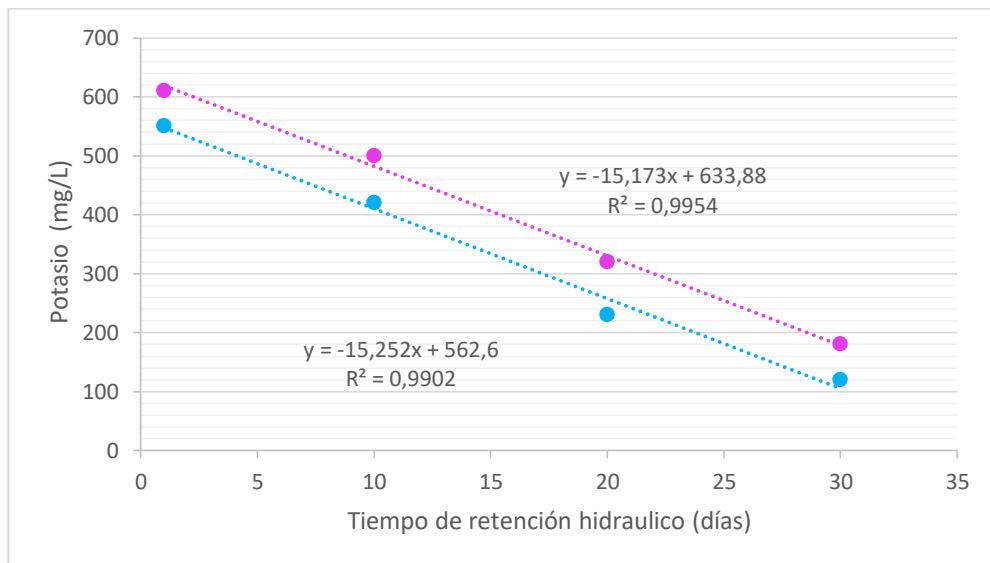
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Nitrógeno**



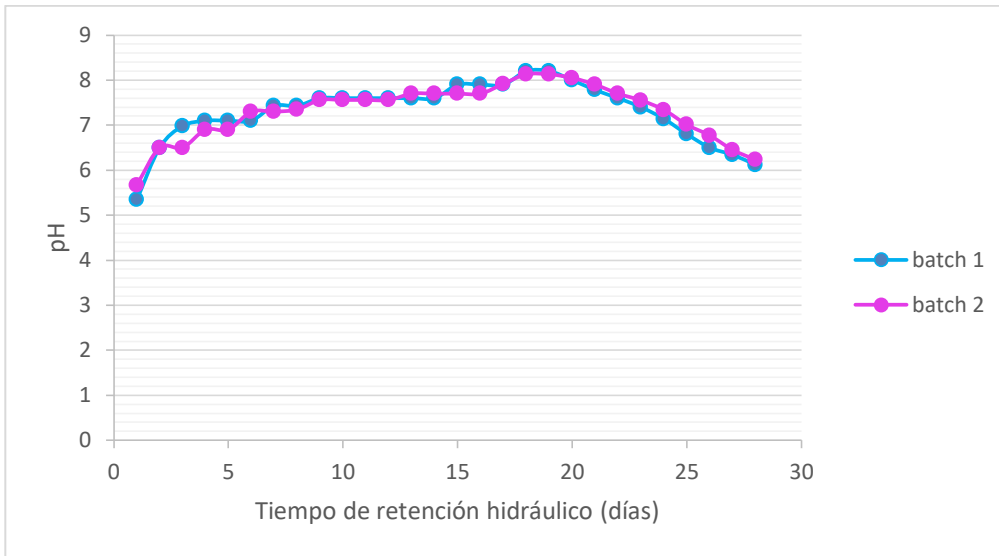
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Potasio**



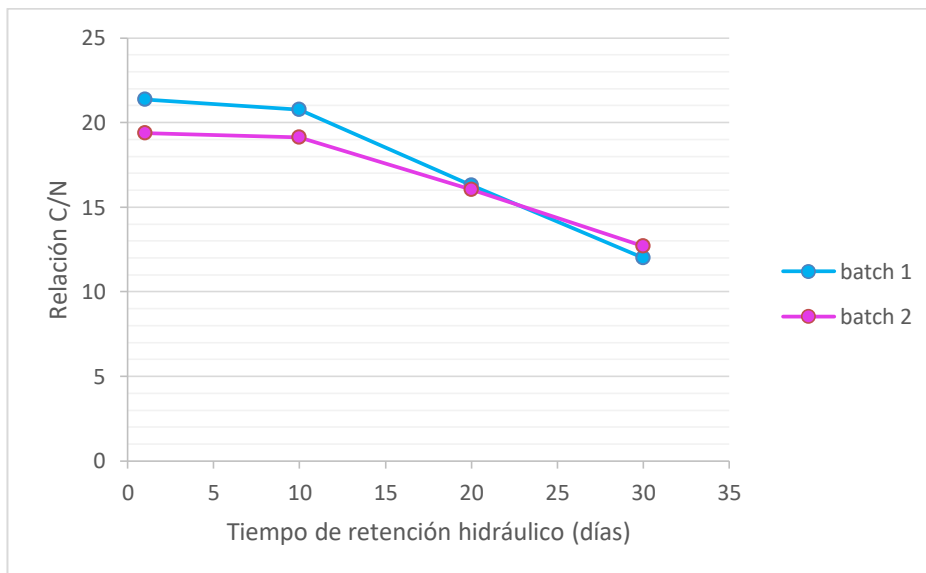
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Potencial de hidrógeno**



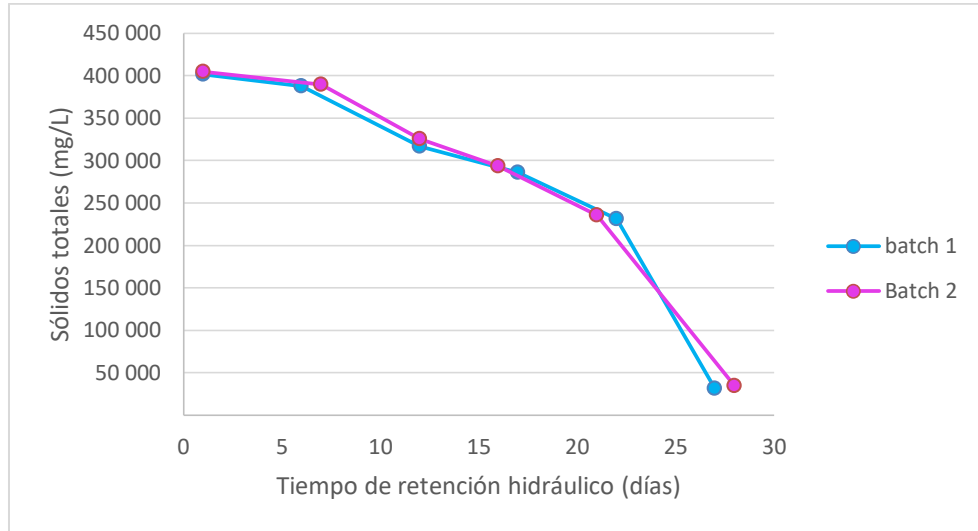
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Relación carbono/nitrógeno**



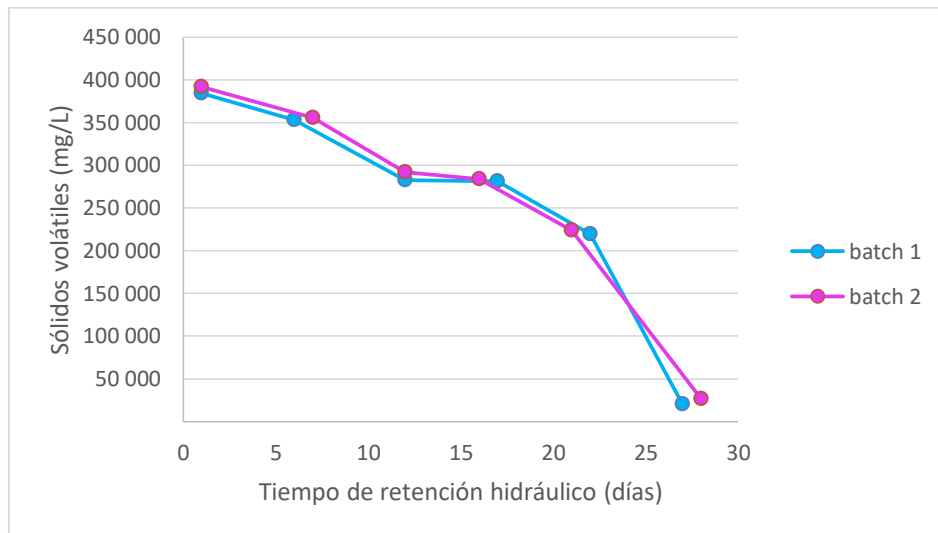
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Sólidos totales**



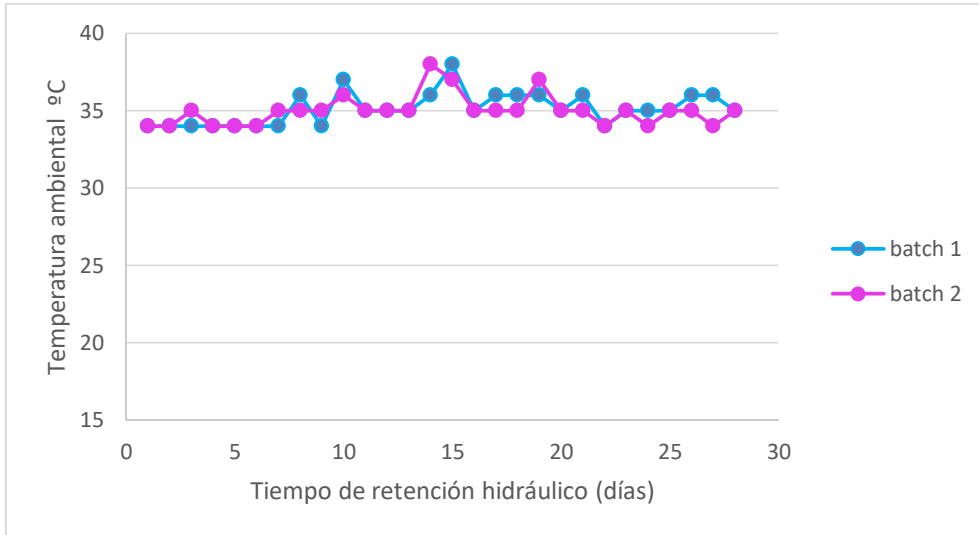
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Sólidos volátiles**



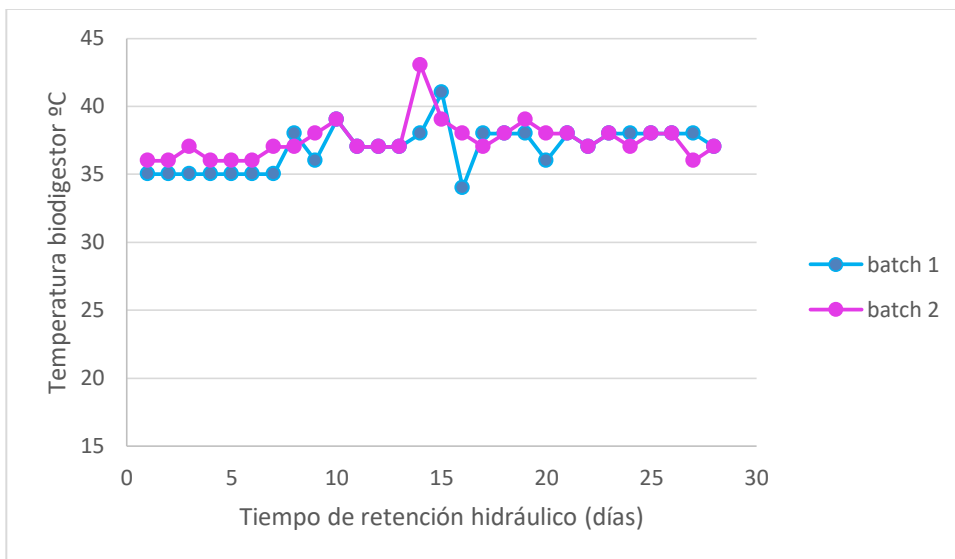
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Temperatura ambiental**



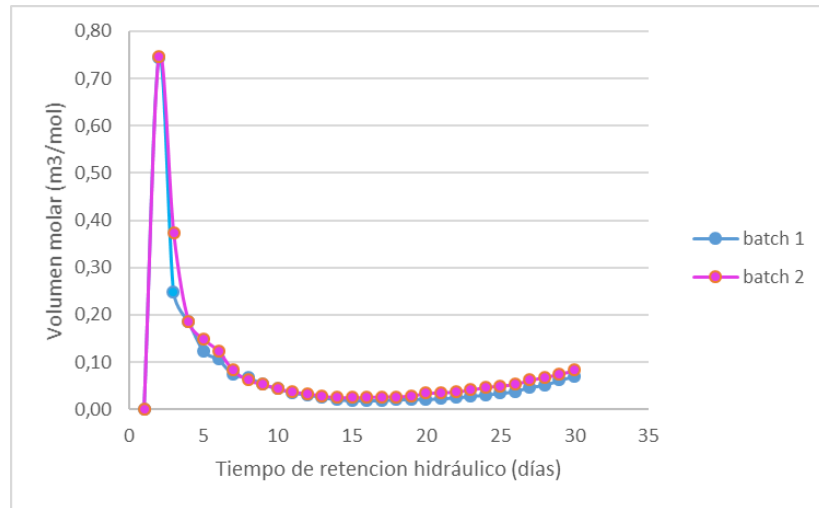
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Temperatura biodigestor**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Volumen gas metano**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Evaluación de producción de metano lote 1**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 32. **Evaluación de producción de biogás lote 2**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

8. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la figura 12 se muestran los resultados para los ácidos grasos volátiles presentes en el biodigestor en ambos lotes, presentando una tendencia descendente respecto al tiempo de retención hidráulico, esto debido a que el pH juega un papel importante en la inhibición de los mismos, a mayor pH, el lodo anaerobio alcanza la capacidad tampón del mismo, por lo tanto no existen ácidos grasos volátiles en la etapa de metanogénesis ya que en esta etapa las únicas bacterias que están presentes son las formadoras de metano las cuales sobreviven en el rango de pH de 7,1 – 8,5. Para ambos lotes la presencia de las bacterias metanogénicas se notó a partir del día 6 del tiempo de retención hidráulico, ya que la presión en el manómetro indicó un mayor aumento, es decir, la producción de metano aumentó considerablemente a partir del respectivo día.

Respecto a los niveles de alcalinidad en el biodigestor para ambos lotes se ven reflejados en la figura 13, presentan una tendencia ascendente respecto al tiempo de retención hidráulico debido a que en la etapa metanogénica presenta buena capacidad de respuesta al contenido de ácidos grasos volátiles, posteriormente a la producción máxima de gas metano en ambos lotes, esta capacidad comienza a disminuir, ya que el biogás que sigue produciéndose tiene bajos niveles de metano debido a la caída del pH y por consiguiente las bacterias presentes en esa etapa son las acetogénicas y acidificantes, las cuales contribuyen nuevamente a la presencia de los ácidos grasos volátiles en concentraciones bajas hasta que llega a su concentración máxima deteniendo por completo la producción de metano.

El carbono orgánico total es una medida del contenido en carbono de las sustancias orgánicas disueltas y en suspensión del agua, en la figura 14 se ilustra el comportamiento del carbono orgánico total para cada lote, es evidente que tiene un comportamiento lineal decreciente, debido a que en conjunto con la determinación del nitrógeno total que es ilustrado en la figura 20 y la relación carbono nitrógeno de los sustratos e inóculos utilizados, son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas, el carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células, es por eso que conforme el tiempo de retención hidráulico transcurre, sus niveles disminuyen, debido a que estos elementos se transforman en gas metano hasta el final del tiempo de retención hidráulico.

Las coliformes son bacterias que habitan en el intestino tanto de los mamíferos como del ser humano, respecto al análisis de coliformes fecales durante el proceso metanogénico para ambos lotes, se evidenció en la figura 16, que el comportamiento que presentó fue decreciente respecto al tiempo de retención hidráulico, estas bacterias están relacionadas estrechamente con la contaminación fecal, es por eso que mediante el tratamiento de la digestión anaerobia, disminuyó considerablemente la presencia de las mismas, presentando un porcentaje de remoción de 87,81 y 84,25 % para los respectivos lotes. Este resultado indica que el proceso de digestión anaerobia operado en régimen mesofílico es adecuado para la reducción de bacterias en el lodo utilizado como sustrato, el cual cumple con los límites máximos permisibles de descargas a los cuerpos receptores según el Acuerdo Gubernativo 236, por lo tanto, no contamina a los mismos.

Paralelamente, el contenido de fósforo, nitrógeno y potasio de las respectivas figuras 19, 20 y 21 presentaron una disminución respecto al tiempo de retención hidráulico, sin embargo, las concentraciones de los parámetros

mencionados anteriormente superan los límites máximos permisibles para la disposición de lodos en la etapa tres, según el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236, por lo tanto puede utilizarse como acondicionador de suelos orgánicos si se combina con un material inerte tal como arcilla o caliza.

Respecto a las figuras 16 y 17 de la demanda bioquímica y química de oxígeno respectivamente, se evidencia que ambas figuras presentan un comportamiento descendente respecto al avance del tiempo de digestión anaerobia, debido a que tanto la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno, son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar. La demanda bioquímica contabiliza la cantidad de oxígeno consumido para degradar la materia orgánica y la demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno requerido para consumir la materia orgánica, es por eso que, al hacer la comparación de ambos, los niveles de DQO respecto de los de DBO son superiores, debido a que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente pero no biológicamente, la relación entre la DBO y la DQO fue de 0,89 y 0,82 para los respectivos lotes, esto indica que son vertidos de naturaleza urbana y tanto más biodegradables, por lo cual pueden ser tratadas mediante tratamientos biológicos . Los porcentajes de remoción respecto al DQO son 93,52 % y 93,10 % para los respectivos lotes, por lo tanto, el tratamiento de residuos por medio de la digestión anaerobia presenta altos niveles de remoción de materia orgánica.

En la figura 25 y 26, respecto al nivel de sólidos totales y volátiles durante el proceso metanogénico cabe destacar que presentó un comportamiento descendente, casi similar, debido a que al inicio del proceso la carga al biodigestor contenía altos niveles de sólidos en un 21 %, los cuales, a través del tratamiento anaeróbico, la influencia de la temperatura y las bacterias

metanogénicas presentes permitieron una remoción de los mismos convirtiendo la mayor parte a gas metano.

En la figura 15 se presenta los resultados de porcentaje de ceniza durante el proceso metanogénico, el comportamiento que señala la figura respecto a ambos lotes es variado, sin embargo, el porcentaje no sobrepasa el 10 %, cabe destacar que el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible, por lo tanto, la cantidad de cenizas no consumidas corresponde al 10 % de sólidos remanente en el abono producido, como lo indica el balance de masa y las referencias bibliográficas.

El potencial de hidrógeno indica el grado de acidez del lodo anaerobio, se determinó el pH al inicio de la carga presentando para ambos lotes un nivel de acidez, por lo tanto, se le añadió lechada de cal para ajustar el pH cerca de la neutralidad y acelerar la producción de gas metano ya que, por ser un proceso anaerobio, debe acondicionarse el lodo anaerobio previo al ingreso del biodigestor, la presencia de oxígeno en el mismo inhibe el proceso metanogénico. El pH tuvo un incremento respecto al tiempo de retención hidráulico debido a la presencia de las bacterias metanogénicas, debido a que el rango óptimo de supervivencia es entre 7,2 y 8,2, posteriormente al día 18 de fermentación el pH empezó a disminuir, debido a que en ambos lotes la producción máxima de metano se produjo cercano al día 15, por lo tanto, el biogás que siguió produciéndose conforme fue disminuyendo el pH su poder calorífico y la composición de metano fue disminuyendo paralelamente, asimismo, al final del tiempo de retención hidráulico se inhibió la producción de metano, porque el pH disminuyó a 6,5 intervalo, en el cual están presentes las bacterias acidogénicas provocando la acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular, particularmente ácidos propiónico y butírico.

La temperatura ambiental y la temperatura generada en el biodigestor tienen estrecha relación, el biodigestor al ser un cuerpo negro y tener alta emisividad, absorbe las ondas electromagnéticas emitidas por la radiación del sol hacia el lodo anaerobio contenido dentro del mismo, por lo tanto, al trabajar en régimen mesofílico, la temperatura del biodigestor aumentó un máximo de 5 °C. Las variaciones de temperatura ambiental se deben a que hubo presencia de lluvia variadamente y por lo tanto, la temperatura del biodigestor al ser función de la temperatura ambiental disminuye en forma proporcional, cabe destacar que, aunque la temperatura se haya visto afectada por la presencia de lluvia, se mantuvo en el régimen mesofílico y no dejó de producir biogás. La temperatura del biodigestor fue medida con una termocupla y los datos de la temperatura ambiental fueron consultados en la página del INSIVUMEH.

En la figura 27 respecto al volumen de gas metano producido durante el tiempo de retención hidráulico se evidencia que a partir del día 2 del proceso en ambos lotes empezó la generación de biogás, en la etapa inicial el porcentaje de metano no representó una parte importante del biogás. Desde el inicio existió un incremento continuo en la generación de gas metano, hasta alcanzar una máxima generación entre los días 13 y 15 para ambos procesos.

Posteriormente a los días donde hubo máxima generación de volumen de gas, se evidenció una disminución continua de generación de biogás, debido a que el pH disminuyó gradualmente como también el metabolismo de bacterias metanogénicas, generando acumulaciones de ácidos grasos volátiles, respecto a la evaluación del biogás producido en cada lote, se realizaron pruebas de combustión al gas generado a los 30 días para determinar si el biogás era rico en metano, las pruebas de combustión resultaron satisfactorias, porque se consumieron 10 libras de presión para el primer lote en 10 minutos y para el segundo lote 10 libras de presión en 7 minutos, determinando que el biogás

generado para ambos lotes obtuvo una composición mayor al 50 % de metano. Se determinó el volumen de metano mediante la aplicación de la ecuación del primer virial, por ser una molécula simétrica y un gas real fue necesario la aplicación de una ecuación de estado para determinarlo. Posteriormente a esto, se determinó la capacidad calorífica del metano a presión constante, utilizando las temperaturas de trabajo de ambos lotes para calcular la entalpía la cual fue de 78,8656 kJ/mol y 97,448 kJ/mol para los respectivos lotes.

Se determinó la eficiencia de los dos lotes las cuales fueron de 87,70 % para el primer lote y 85,69 % presentando un buen tratamiento para la generación, tanto de biogás como de biol para que pueda ser utilizado posteriormente en los campos de cultivo de semilla de caña.

El análisis estadístico muestra que no existe diferencia significativa entre las medias obtenidas de las propiedades fisicoquímicas de los desechos anaerobios, durante el proceso metanogénico para la obtención de biogás. El análisis estadístico está basado en una diferencia de medias de dos poblaciones, quedando el estadístico de prueba en la región de aceptación con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla XXIX. Cronograma

Fase	Actividad	Tiempo (meses)											
		Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo			
1	Cotización de biodigestores												
	Comparación entre cotizaciones de biodigestores												
	Entrega de perfil												
	Visita de campo a granja Toledo												
	Visita de campo a Chicho y Legumex												
2	Investigación												
	Determinación de parámetros de diseño del biodigestor												
	Diseño de biodigestor												
	Calculo de presupuesto de biodigestor tipo geomembrana PVC												
	Entrega de anteproyecto												
3	Construcción de biodigestor												
	Recolección de desechos y carga de biodigestor												
	Muestreo y análisis fisicoquímico durante el proceso metanogénico												
	Producción de biogás												
4	Elaboración de resultados finales												
	Capacitación al personal sobre la obtención del biogás y uso de biodigestor												
	Elaboración de informe final												

Fuente: elaboración propia.

9. PRESUPUESTO

9.1. Presupuesto de materiales para instalación de biodigestor tipo geomembrana PVC

A continuación se detallan los gastos de los materiales necesarios para la construcción de la zanja donde iría almacenado el biodigestor, asimismo, el invernadero que lo protegerá de factores ambientales tales como la lluvia, vientos, entre otros.

Tabla XXX. Costos de materiales de zanja e invernadero

Material	Existencia en almacen	Costo Unitario	Cantidad Necesaria	Total
Block 14x19x39	100 unidades	Q2,28	450 unidades	Q1 026,00
Block Solera	150 unidades	Q2,63	140 unidades	Q368,20
Piedrín de 1/2	0,00	Q71,43	6 m3	Q428,58
Clavo de 3"	33 libras	Q2,59	10 libras	Q25,90
Alambre de amarre	91 libras	Q2,68	25 libras	Q67,00
Hierro de 3/8	7 091,910 pies	Q0,68	38 varillas (aprox 761 pies)	Q517,48
Hierro de 1/4	1 623,580 pies	Q0,26	20 varillas (aprox 401 pies)	Q104,26
Tabla de 1"x12"x10'	70,000 pies	Q4,46	12 unidades	Q53,52
Cemento (Sacos 42,5 kg)	747 sacos	Q57,90	60 bolsas	Q3 474,00
Arena de río	0,00	Q1,87	12 m3	Q22,44
Costanera de 6"x2"	996,50 pies	Q5,26	22 unidades	Q115,72
Costanera de 4"x2"	260 pies	Q4,45	24 unidades	Q106,80
Lámina troquelada de 1Mx7'	2,00	Q208,93	44 unidades	Q9 192,92
Electródo 6013 de 1/8	1 407 libras	Q6,61	20 libras	Q132,20
Pintura anticorrosiva	10 galones	Q100	5 Galones	Q500
Brochas de 4"	100,00	Q10,76	4 unidades	Q43,04
Discos para cortar metal de 9"	37 unidades	Q13,75	8 unidades	Q110,00
10% de gastos totales				Q1 628,81
TOTAL				Q17 916,87

Fuente: elaboración propia.

9.1.1. Presupuesto de costo de mano de obra

Tabla XXXI. Costo de mano de obra para biodigestor tipo geomembrana PVC

Descripción de Labor	Cantidad de Días	Cantidad de Personas	Sueldo por persona durante 21	
Trazado de zanja	2	2 albañiles y 2 ayudantes	1 albañil	Q3 763,10
Corte de terreno	3		1 ayudante	Q3 484,13
Armadura y fundición	3		Salario total	Q14 494,46
Fundición de solera	2		Nota: Se contratarán a dos albañiles y a dos ayudantes para poder realizar la labor	
Levantado de Block	6			
Caja ingreso y egreso (Afluente y Efluente)	3			
Limpieza	1			
Maquinaria	1			
Total de días	21 días			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Presupuesto biodigestor anaerobio

Costo de materiales reactor anaerobio	Q850,00
Análisis de laboratorio	Q3 600,00
Mano de obra	Q150,00
Traslado de estiércol de vaca	Q85,00
Sueldo epesista durante el proyecto	-----
TOTAL	Q4 685,00

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La cantidad de desechos que se utilizaron para llevar a cabo la digestión anaerobia fue de 45 kg de heces vacunas y restos de comida respectivamente como también 100 litros de aguas residuales de sanitarios y mingitorios, los cuales se calcularon a partir de un balance de masas.
2. Ambos lotes presentaron porcentajes de remoción considerables en cada parámetro medido de entrada respecto del de salida, lo que indica que el tratamiento por digestión anaerobia fue eficaz para la producción de metano y bioabono.
3. El biol generado puede ser utilizado como acondicionador de suelos combinándolo con un material inerte como arcilla o caliza.
4. La eficiencia para ambos lotes en el biodigestor piloto fue de 87,70 y 85,69 % respectivamente.
5. El volumen generado para ambos lotes fue de 0,0784 m³ y 0,0889 m³ durante un tiempo de retención hidráulico de 30 días operando en régimen mesofílico.
6. La calidad de biogás generado para ambos lotes resultó satisfactoria mediante la prueba de combustión con aproximadamente 50 % de metano.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar biodigestores de metal con tuberías soldadas porque proporcionan hermeticidad en el proceso, evitando las pérdidas de gas metano por fugas.
2. Agregar lechada de cal al inicio de cada lote, al lodo anaerobio para estabilizar su pH y acelerar la producción de metano.
3. Utilizar equipo de protección personal al momento de extraer las muestras del biodigestor como al momento de analizarlas.
4. Verificar que el gasómetro no tenga fugas para evitar que el gas sea emanado a la atmósfera.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALCÍVAR GONZÁLEZ, Byron Fernando., & FARÍAS JAEN, Cristhian. *Estudio para la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica alternativo a partir de desechos biodegradables*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil. 2007. 302 p.
2. ARCE GONZÁLEZ, Jorge Jimmy. *Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable a zonas agrarias del litoral*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana. 2011. 79 p.
3. DÍAZ DOMINGUEZ, Yosvany. *Empleo de pretratamientos básicos para mejorar la digestión anaerobia de los residuales domésticos en la planta de biogás Sobacken, Suecia*: Universidad Tecnológica de la Habana. 2009. 429 p.
4. El Periódico. *El biogás, transformando el estiércol en energía limpia en Guatemala*. Summa. 1. 2010. 15 p.
5. ————. *Empresa retoma plan para producir biogás en relleno sanitario*. 2015. 1 p.
6. FLOTAT, Xavier., CAMPOS, Eduardo., & BONMATI, August. *Aprovechamiento energético de residuos ganaderos*. Lleida:

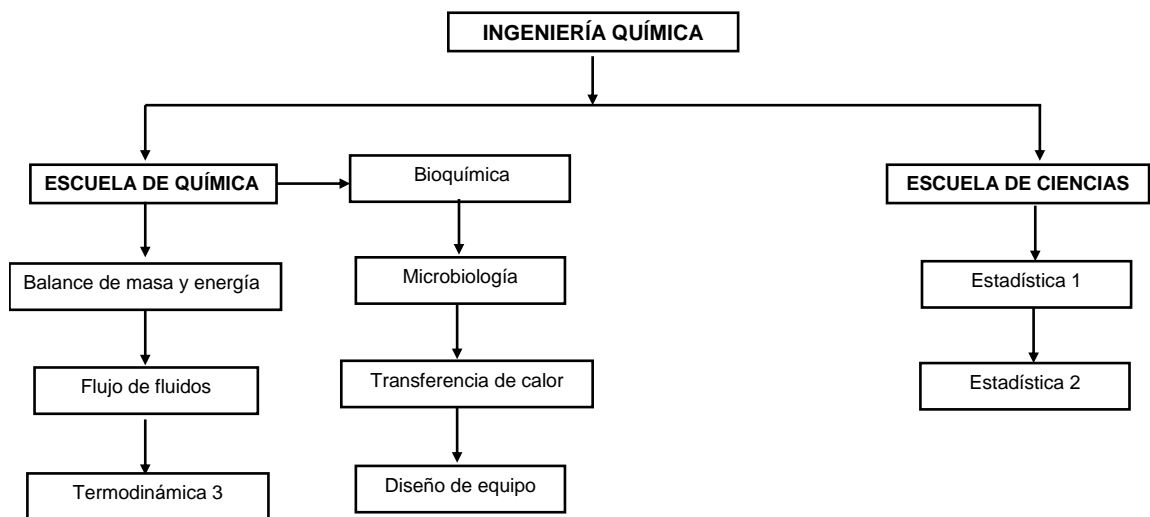
Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. 1997. 210 p.

7. FORGET, Astrid. *Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares*. 2011. 123 p.
8. GUEVARA HERNÁNDEZ, Vera Alejandra. *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente OPS. 1996. 110 p.
9. HERNÁNDEZ, Juan Carlos. *Biodigestores en Guatemala*. septiembre 2016. 180 p.
10. HILBERT, Jorge Antonio. *Manual para la producción de biogás*. Buenos Aires: Instituto de Ingeniería Rural. 2006. 135 p.
11. LAGRANGE, Bart. *Biomethane principles techniques, vol 2*. Alternative energies. 1979. 87 p.
12. MARTÍ HERRERO, Jaime. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. La Paz, Bolivia: Cooperación Técnica Alemana, ISBN: 978-99954-0-339-3, 2008. 128 p.
13. SPEECE, Ryan Ericson. Trace metals in: *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*. Nashville, TN. 1996. 98 p.
14. VELSEN VAN & LETTING G. *Effect of feed composition on digestion performance in anaerobic digestion*. 1980. 140 p.

15. VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual de reciclaje orgánico y biogás*. Ministerio de Agricultura (FIA), Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile. 2011. 119 p.

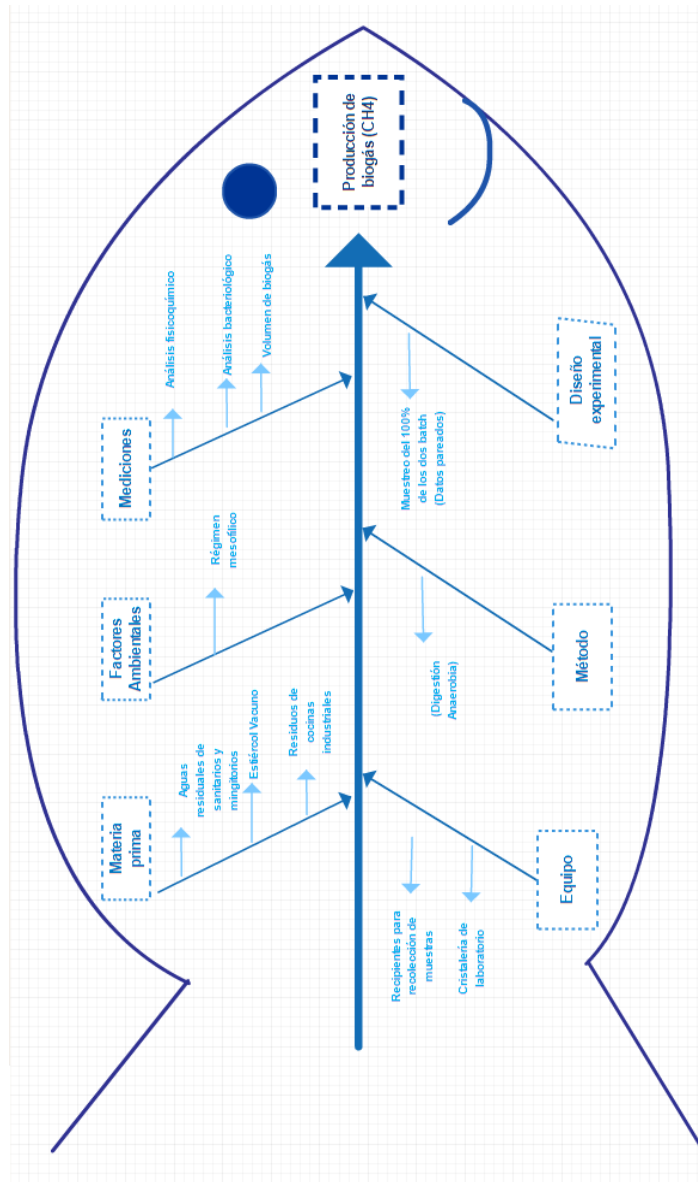
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Porcentajes de remoción lote 1**

Parámetro medido	Concentración inicial (Ci)	Concentración final (Cf)	Porcentaje de remoción (%)
Ácidos grasos volátiles	4 400	1 000	77,27 %
Alcalinidad	5 000	9 333	86,66 %
Carbono orgánico total	136 664	12 120	91,13 %
Ceniza	4,47	7,49	67,56 %
Coliformes fecales	7,20E+03	8,78E+02	87,81 %
Demanda bioquímica de oxígeno	6 120	396	93,53 %
Demanda química de oxígeno	6 724	1 025	84,76 %
Fósforo	1 026	153	85,09 %
Nitrógeno	6 414	1 010	84,25 %
Potasio	5 451	1 190	78,17 %
Potencial de hidrógeno	5,34	6,12	-----
Relación carbono nitrógeno	21,30	12	77,5 %
Sólidos totales	401 266	31 460	92,16 %
Sólidos volátiles	384 444	20 384	94,70 %
Temperatura ambiental	34	34	-----
Temperatura biodigestor	35	36	-----

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Porcentajes de remoción lote 2**

Parámetro medido	Concentración inicial (Ci)	Concentración final (Cf)	Porcentaje de remoción (%)
Ácidos grasos volátiles	4 000	600	85,00 %
Alcalinidad	5 333	9 500	78,14 %
Carbono orgánico total	130 720	16 510	87,37 %
Ceniza	5,47	7,86	43,69 %
Coliformes fecales	6,30E+03	9,92E+02	84,25 %
Demanda bioquímica de oxígeno	6 040	417	93,10 %
Demanda química de oxígeno	6 800	1 233	81,87 %
Fósforo	961	69	92,82 %
Nitrógeno	6 750	1 300	80,74 %
Potasio	6 100	1 800	70,49 %
Potencial de hidrógeno	5,67	6,23	-----
Relación carbono nitrógeno	19,36	12,7	52,44 %
Sólidos totales	404 766	34 580	91,46 %
Sólidos volátiles	391 904	26 820	93,16 %
Temperatura ambiental	34	34	-----
Temperatura biodigestor	36	36	-----

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Resultados de laboratorio

Lote 1								
Fecha de análisis	Carbono orgánico total (ppm)	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	Demanda química de oxígeno (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Potasio (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Relación C/N
20/03/2017	136 664	7,20E+03	6 120	6 724	6 400	550	1 030	21,35
29/03/2017	106 403	5,46E+03	4 305	4 523	5 123	420	800	20,77
08/04/2017	50 349	3,45E+03	2 640	2 789	3 089	230	450	16,30
18/04/2017	12 120	8,78E+02	396	1 025	1 010	120	150	12,00
Lote 2								
Fecha de análisis	Carbono orgánico total (ppm)	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	Demanda química de oxígeno (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Potasio (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Relación C/N
25/04/2017	130 720	6,30E+03	6 040	6 800	6 750	610	991	19,37
05/05/2017	87 900	4,95E+03	3 937	4 697	4 595	500	702	19,13
14/05/2017	47 029	2,67E+03	2 460	2 871	2 934	320	315	16,03
24/05/2017	16 510	9,92E+02	417	1 233	1 300	180	70	12,70

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Resultados de laboratorio

Lote 1							
Fecha	Día	Volumen muestra (L)	Po (g)	P1 (g)	P2 (g)	Sólidos totales (mg/l)	Sólidos volátiles (mg/l)
20/03/2017	1	0,05	65,6123	85,6756	66,4534	401 266	384 444
25/03/2017	6	0,05	65,6125	84,9986	67,3432	387 722	353 108
31/03/2017	12	0,05	65,6365	81,4567	67,3245	316 404	282 644
05/04/2017	17	0,05	66,4067	80,7057	66,6382	285 980	281 350
10/04/2017	22	0,05	65,6496	77,2081	66,2313	231 170	219 536
15/04/2017	27	0,05	65,5671	67,1401	66,1209	31 460	20 384
Lote 2							
Fecha	Día	Volumen muestra (L)	Po (g)	P1 (g)	P2 (g)	Sólidos totales (mg/l)	Sólidos volátiles (mg/l)
23/03/2017	1	0,05	65,6678	85,9061	66,3109	404 766	391 904
28/03/2017	7	0,05	65,6287	85,1009	67,3265	389 444	355 488
03/04/2017	12	0,05	65,6312	81,9071	67,3011	325 518	292 120
07/04/2017	16	0,05	66,2309	80,8844	66,7077	293 070	283 534
12/04/2017	21	0,05	65,6385	77,4122	66,2055	235 474	224 134
19/04/2017	28	0,05	65,7123	67,4413	66,1003	34 580	26 820

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Resultados de laboratorio

Lote 1			Lote 2		
Fecha de análisis	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Ácidos grasos volátiles (mg CH ₃ COOH/L)	Fecha de análisis	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Ácidos grasos volátiles (mg CH ₃ COOH/L)
20/03/2017	5 000	4 400	25/04/2017	5 333	4 000
21/03/2017	9 333	1 000	26/04/2017	9 333	1 000
24/03/2017	9 667	200	29/04/2017	9 500	600
25/03/2017	9 833	0	30/04/2017	9 667	200
31/03/2017	10 500	0	06/05/2017	10 333	0
01/04/2017	10 500	0	07/05/2017	10 333	0
02/04/2017	10 500	0	08/05/2017	10 333	0
09/04/2017	11 167	0	15/05/2017	11 000	0
14/04/2017	9 833	0	20/05/2017	10 000	0
18/04/2017	9 333	1 000	24/05/2017	9 500	600

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Resultados de laboratorio

Lote 1					
Fecha	Día	Peso crisol vacío	Peso crisol + muestra fresca	Peso crisol + muestra seca	% ceniza
20/03/2017	1	66,0591	68,0601	66,1486	4,47
26/03/2017	7	66,0737	68,0840	66,1821	5,39
31/03/2017	12	66,0687	68,3059	66,2378	7,56
04/04/2017	16	66,0704	67,2838	66,1232	4,35
09/04/2017	21	66,0723	68,1044	66,1771	5,16
16/04/2017	28	66,0790	68,3040	66,2456	7,49
Lote 2					
Fecha	Día	Peso crisol vacío	Peso crisol + muestra fresca	Peso crisol + muestra seca	% ceniza
25/04/2017	1	66,0423	68,0513	66,1521	5,47
01/05/2017	7	66,0690	68,0919	66,1902	6,0
06/05/2017	12	66,0634	68,3141	66,2390	7,80
10/05/2017	16	66,0510	67,2688	66,1209	5,74
15/05/2017	21	66,0655	68,1022	66,1798	5,61
22/05/2017	28	66,0713	68,2890	66,2456	7,86

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Volumen molar lote 1

Fecha	Día	Presión de trabajo (ps)	Presión crítica (ps)	Presión crítica (ps)	Presión crítica (ps)	Presión crítica (ps)	Temperatura crítica (°F)	Temperatura crítica (°C)	Temperatura de reducción (°F)	Temperatura de reducción (°C)	Factor acético (w)	B ₀	B ₁	Z ₀	Z ₁	Factor de compresibilidad (z)	Constante (R _{ps}) (m ³ /mol ²)	Volumen molar producido (m ³ /mol)
2/03/2017	1	0	0,00	469,937	0,0000	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	1	0	0	0,9995	8,3161	0,0000	
2/03/2017	2	0,5	3,447,50	469,937	0,0274	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	3,3146	0,5	0,9995	8,3161	0,7434	
2/03/2017	3	1,5	19,842,50	469,937	0,0272	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	1,9964	1,5	0,9995	8,3161	0,4409	
2/03/2017	4	2	37,983,00	469,937	0,0299	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	1,2864	2	0,9995	8,3161	0,3076	
2/03/2017	5	3	57,063,00	469,937	0,0444	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,9999	3	0,9995	8,3161	0,2383	
2/03/2017	6	3,5	74,182,50	469,937	0,0518	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,7726	3,5	0,9995	8,3161	0,1913	
2/03/2017	7	5	124,753,00	469,937	0,0740	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,5346	5	0,9995	8,3161	0,1208	
2/03/2017	8	5,5	149,263,00	469,937	0,0814	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,4854	5,5	0,9995	8,3161	0,1028	
2/03/2017	9	8,5	249,263,00	469,937	0,1158	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,3114	8,5	0,9995	8,3161	0,0628	
2/03/2017	10	8,5	249,263,00	469,937	0,1158	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,3114	8,5	0,9995	8,3161	0,0628	
2/03/2017	11	8,5	249,263,00	469,937	0,1158	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,3114	8,5	0,9995	8,3161	0,0628	
2/03/2017	12	11	379,263,00	469,937	0,1554	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,2114	11	0,9995	8,3161	0,0428	
2/03/2017	13	11	379,263,00	469,937	0,1554	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,2114	11	0,9995	8,3161	0,0428	
2/03/2017	14	14	529,263,00	469,937	0,2114	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1514	14	0,9995	8,3161	0,0328	
2/03/2017	15	14	529,263,00	469,937	0,2114	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1514	14	0,9995	8,3161	0,0328	
2/03/2017	16	20	879,263,00	469,937	0,2968	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1014	20	0,9995	8,3161	0,0228	
2/03/2017	17	20	879,263,00	469,937	0,2968	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1014	20	0,9995	8,3161	0,0228	
2/03/2017	18	18	729,263,00	469,937	0,2388	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1214	18	0,9995	8,3161	0,0328	
2/03/2017	19	17,5	704,263,00	469,937	0,2358	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1244	17,5	0,9995	8,3161	0,0328	
2/03/2017	20	17,5	704,263,00	469,937	0,2358	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1244	17,5	0,9995	8,3161	0,0328	
2/03/2017	21	21	1024,263,00	469,937	0,3214	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,0814	21	0,9995	8,3161	0,0228	
2/03/2017	22	21	1024,263,00	469,937	0,3214	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,0814	21	0,9995	8,3161	0,0228	
2/03/2017	23	35	1624,263,00	469,937	0,4968	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,0514	35	0,9995	8,3161	0,0128	
2/03/2017	24	35	1624,263,00	469,937	0,4968	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,0514	35	0,9995	8,3161	0,0128	
2/03/2017	25	11	754,263,00	469,937	0,1418	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1714	11	0,9995	8,3161	0,0428	
2/03/2017	26	8	554,263,00	469,937	0,1018	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1914	8	0,9995	8,3161	0,0528	
2/03/2017	27	8	554,263,00	469,937	0,1018	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,1914	8	0,9995	8,3161	0,0528	
2/03/2017	28	7,2	494,263,00	469,937	0,0968	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,2014	7,2	0,9995	8,3161	0,0628	
2/03/2017	29	6	413,263,00	469,937	0,0888	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,2114	6	0,9995	8,3161	0,0728	
2/03/2017	30	5,3	363,263,00	469,937	0,0838	190,6	308,15	1,6164	0,02	-0,1126	0,1163	0,9995	0,2214	5,3	0,9995	8,3161	0,0828	

Fuente: VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual de reciclaje orgánico y biogás*. Ministerio de Agricultura (FIA), Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Santiago, Chile. 2011. p. 75.

Anexo 2. Volumen molar lote 2

Fecha	Día	Presión de trabajo (psi)	Presión de trabajo (pa)	Presión crítica metano (pa)	Presión reducida (pa)	Temperatura crítica metano (°K)	Temperatura diaria (°K)	Temperatura reducida (°K)	Factor acémtrico (w)	Bo	Bl	Zo	Zl
25/04/2017	1	0	0,00	4.659.937	0,00000	190,6	309,15	1.62198	0,012	-0,11164	0,11644	1	0
26/04/2017	2	0,5	3.447,50	4.659.937	0,00074	190,6	309,15	1.62198	0,012	-0,11164	0,11644	0,99990	5,311E-05
27/04/2017	3	1	6.895,00	4.659.937	0,00148	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99990	1,062E-04
28/04/2017	4	2	13.790,00	4.659.937	0,00296	190,6	309,15	1.62198	0,012	-0,11164	0,11644	0,99980	2,124E-04
29/04/2017	5	2,5	17.337,50	4.659.937	0,00370	190,6	309,15	1.62198	0,012	-0,11164	0,11644	0,99975	2,656E-04
30/04/2017	6	3	20.685,00	4.659.937	0,00444	190,6	309,15	1.62198	0,012	-0,11164	0,11644	0,99969	3,187E-04
01/05/2017	7	4,5	31.027,50	4.659.937	0,00666	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99955	4,777E-04
02/05/2017	8	6	41.370,00	4.659.937	0,00888	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99940	6,369E-04
03/05/2017	9	7	48.265,00	4.659.937	0,01036	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99930	7,426E-04
04/05/2017	10	8,5	58.607,50	4.659.937	0,01258	190,6	312,15	1.63772	0,012	-0,10866	0,11734	0,99917	9,011E-04
05/05/2017	11	10	68.950,00	4.659.937	0,01480	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99899	1,062E-03
06/05/2017	12	11	75.845,00	4.659.937	0,01628	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99889	1,168E-03
07/05/2017	13	13	89.635,00	4.659.937	0,01924	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99869	1,380E-03
08/05/2017	14	15	103.425,00	4.659.937	0,02219	190,6	316,15	1.63772	0,012	-0,10479	0,11847	0,99860	1,585E-03
09/05/2017	15	15	103.425,00	4.659.937	0,02219	190,6	312,15	1.63772	0,012	-0,10866	0,11734	0,99853	1,590E-03
10/05/2017	16	14,5	99.977,50	4.659.937	0,02145	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99856	1,538E-03
11/05/2017	17	14	96.530,00	4.659.937	0,02071	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99859	1,486E-03
12/05/2017	18	14	96.530,00	4.659.937	0,02071	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99861	1,485E-03
13/05/2017	19	13	89.635,00	4.659.937	0,01924	190,6	312,15	1.63772	0,012	-0,10866	0,11734	0,99872	1,378E-03
14/05/2017	20	11	75.845,00	4.659.937	0,01628	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99891	1,167E-03
15/05/2017	21	10,5	72.397,50	4.659.937	0,01554	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99896	1,114E-03
16/05/2017	22	10	68.950,00	4.659.937	0,01480	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99899	1,062E-03
17/05/2017	23	9	62.055,00	4.659.937	0,01332	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99911	9,548E-04
18/05/2017	24	8	55.160,00	4.659.937	0,01184	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99920	8,492E-04
19/05/2017	25	7,5	51.712,50	4.659.937	0,01110	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99925	7,956E-04
20/05/2017	26	7	48.265,00	4.659.937	0,01036	190,6	311,15	1.63248	0,012	-0,10964	0,11704	0,99930	7,426E-04
21/05/2017	27	6	41.370,00	4.659.937	0,00888	190,6	309,15	1.62198	0,012	-0,11164	0,11644	0,99939	6,373E-04
22/05/2017	28	5,5	37.922,50	4.659.937	0,00814	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99945	5,839E-04
23/05/2017	29	5	34.475,00	4.659.937	0,00740	190,6	310,15	1.62723	0,012	-0,11064	0,11674	0,99950	5,308E-04
24/05/2017	30	4,5	31.027,50	4.659.937	0,00666	190,6	309,15	1.62198	0,012	-0,11164	0,11644	0,99954	4,780E-04

Fuente: VERNERO MORENO, María Teresa. *Manual de reciclaje orgánico y biogás*. Ministerio de Agricultura (FIA), Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Santiago, Chile. 2011. p. 75.

Anexo 3. **Recolección de estiércol vacuno**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 4. **Sistema de digestión anaerobia**



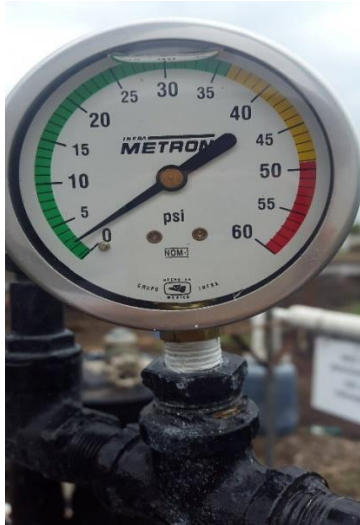
Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 5. Reactor piloto anaerobio



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 6. **Inicio de producción de biogás lote 2**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 7. **Trampa de agua**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 8. Filtro de ácido sulfhídrico



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 9. Gasómetro



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 10. Inicio de producción biogás lote 1



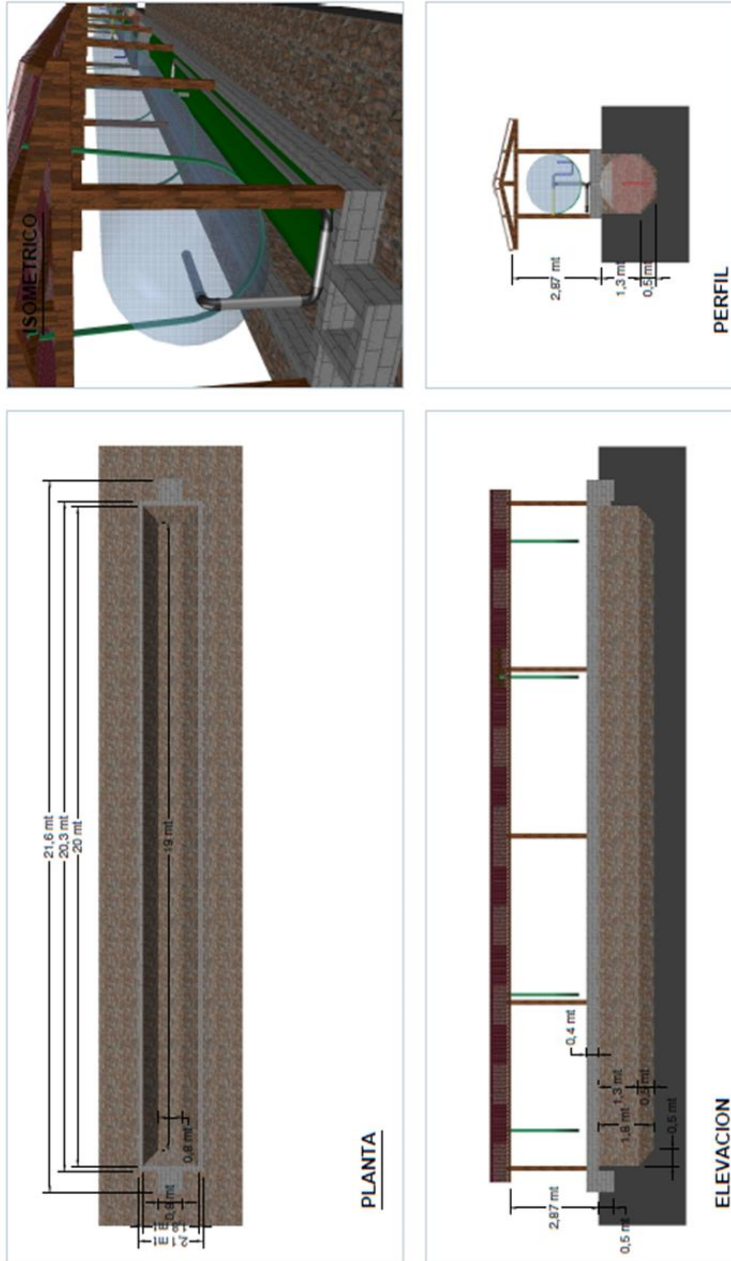
Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 11. Termocupla



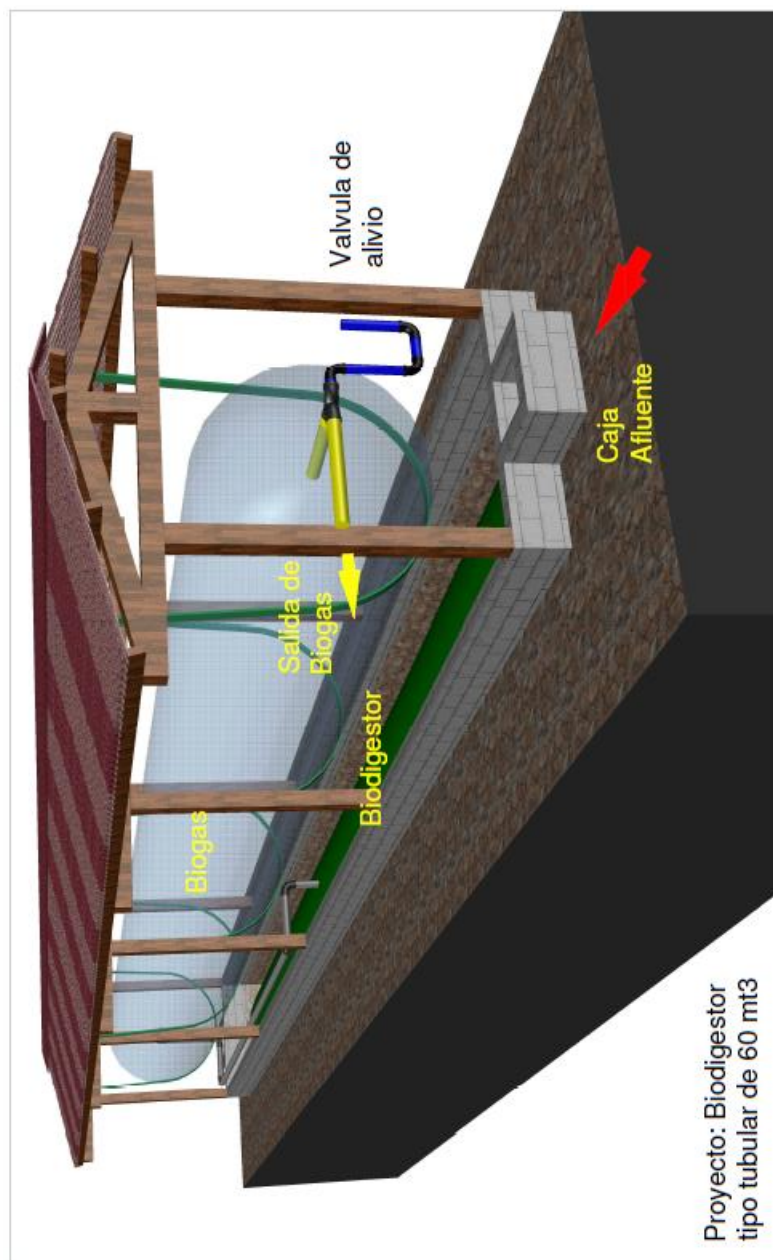
Fuente: Ingenio Santa Ana.

Anexo 12. **Plano de excavación biodigestor con capacidad de 60 m³**



Fuente: PAREDES, Mynor – GUATEVERDE Ingeniería S.A.

Anexo 13. **Biodigestor geomembrana PVC de 60 m³**



Fuente: PAREDES, Mynor – GUATEVERDE Ingeniería S.A