

PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN
JERUSALÉN (CUNDINAMARCA)

GUTIÉRREZ TAMAYO PAULA ANDREA
RODRÍGUEZ TORRES CLAUDIA CAROLINA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN
JERUSALÉN (CUNDINAMARCA)

GUTIÉRREZ TAMAYO PAULA ANDREA
RODRÍGUEZ TORRES CLAUDIA CAROLINA

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
EDWIN GARCÍA
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., Enero de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo De Jesús Herrera Gutiérrez

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

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios por brindarnos la oportunidad de obtener un logro más en nuestra vida y por regalarnos fortaleza, salud y sabiduría para poder sobrellevar cada uno de los obstáculos que se presentaron para la realización de este proyecto.

A nuestros padres por su dedicación y entrega abnegada en todos estos años y más ahora en este nuevo trasegar de la vida. Han sido indispensables en esta etapa y sin su ayuda no seríamos lo que logramos ser ni mucho menos llegar hasta donde hemos alcanzado arribar.

A la tutora de tesis por sus pertinentes apreciaciones, por su guía, por su acompañamiento y por hacer parte de este proyecto de grado brindándonos consejos, enseñanzas y orientaciones a lo largo del presente trabajo. A los ingenieros de la Corporación Autónoma Regional por ayudarnos con la información necesaria y pruebas experimentales que se solicitaron en el proyecto.

Es difícil dejar de mencionar familiares, amigos o personas que fueron partícipes de este proyecto de grado a los que también va nuestra sentida mención de gratitud.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	20
1. GENERALIDADES	21
1.1 BIODIGESTORES	21
1.2 GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL MUNDO	22
1.3 TIPOS DE BIODIGESTORES	23
1.3.1 Plantas de globo	23
1.3.2 Plantas de domo fijo	23
1.3.3 Plantas de domo flotante	24
1.4 BIOGÁS	25
1.4.1 El biogás y sus componentes	25
1.5 BIOMASA	26
1.6 FUENTES Y CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA	27
1.6.1 Tipos de Biomasa	27
1.6.1.1 Biomasa Natural	28
1.6.1.2 Biomasa Residual	28
1.6.1.3 Cultivos Energéticos	28
1.7 RELACIÓN FOS/TAC	29
1.7.1 Determinación relación FOS/TAC	30
1.7.2 Uso de la relación FOS/TAC	30
1.8 FUNDAMENTOS DE LA FERMENTACION METANOGENICA	31
1.8.1 Etapas de la fermentación metanogénica	31
1.8.1.1 Hidrólisis	31
1.8.1.2 Etapa Fermentativa o Acidogénica	31
1.8.1.3 Etapa Acetogénica	31
1.8.1.4 Etapa Metanogénica	32
1.9 MICROORGANISMOS INVOLUCRADOS EN CADA FASE DE DIGESTIÓN ANAEROBICO	32
1.9.1 Bacterias en la hidrólisis.	32
1.9.2 Bacterias en la acidogénesis	33
1.9.3 Bacterias en la acetogénesis	33
1.9.4 Bacterias en la metanogénesis	33
1.10 FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGAS	33
1.10.1 Naturaleza y composición de materias primas	33
1.10.2 Relación Carbono/ Nitrógeno de las materias primas	37
1.10.3 Sólidos Totales (kg/m ³)	38
1.10.4 Sólidos Volátiles (kg/m ³)	38
1.10.5 Temperatura	38
1.10.6 Rangos de pH y alcalinidad en el proceso y en la biomasa	40
1.10.7 pH en la biomasa	41

2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGAS	42
2.1 DATOS BÁSICOS DE JERUSALEN	42
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	43
2.2.1 Recolección de desechos animales.	44
2.2.2 Alimentación	44
2.2.3 Agitación	44
2.2.4 Extracción de lixiviados	44
2.2.5 Gas Obtenido	44
2.2.6 Sistema de drenaje	44
2.3 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA ALIMENTADA AL BIODIGESTOR	45
2.3.1 Metodología FOS /TAC	45
2.3.2 Análisis de pH	47
2.3.3 Análisis de temperatura	48
2.4. METODOLOGIA PARA EL CONTENIDO DE METANO EN EL BIOGÁS PRODUCIDO	48
2.4.1 Análisis del contenido de metano	51
2.5 PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS	53
2.5.1 Cálculo de la producción de Biogás	55
2.6. INCONSISTENCIAS	55
2.6.1 Carga	55
2.6.2 Válvulas y conexiones	56
2.6.3 Fugas del biodigestor	56
2.6.4 Sistema de Agitación	57
3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	59
3.1 PLANTEAMIENTO DE POSIBLES ALTERNATIVAS	59
3.1.1 Selección de Materias Primas	59
3.1.2 Carga	59
3.1.3 Agitación	60
3.1.4 Sellado del Biodigestor	60
3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	62
4. EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	65
4.1 METODOLOGÍA REALIZADA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	65
4.2. PRUEBAS REALIZADAS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE METANO Y RELACIÓN FOS/TAC	67
4.2.1 Análisis relación FOS/TAC	67
4.2.2 Análisis de pH	68
4.2.3 Análisis del contenido de Metano	70
4.2.4 Temperatura	71
4.2.5 Prueba de inflamabilidad	71
4.3 Especificaciones técnicas	73

4.3.1 Carga en función de materias primas	73
4.3.2 Parámetros de operación	73
4.4 DETERMINACIÓN EN PESO DE EFLUENTES O LODOS	74
4.5 DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DEL PROCESO	76
4.5.1 Etapas del proceso,	77
5. EVALUACIÓN FINANCIERA	80
5.1 INVERSIONES DE CAPITAL (CAPEX)	80
5.2 GASTOS OPERACIONALES (OPEX)	81
5.3 CLASIFICACIÓN DE COSTOS	81
5.4 CÁLCULO DE LA TIO (Tasa interna de oportunidad)	83
5.5 ESTIMACIÓN CONSUMO DE GAS	83
5.6 EVALUACIÓN FINANCIERA	85
5.6.1 Flujo de caja escenario sin proyecto	85
5.6.2 Flujo de caja con proyecto	85
5.6.3 Flujo de caja total	85
5.6.4 Cálculo de VPN	86
5.7 EVALUACIÓN BENEFICIO /COSTO (B/C)	87
6. CONCLUSIONES	88
7. RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFIA	91
ANEXOS	95

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Propiedades de una composición estándar de biogás	26
Tabla 2 : Estados Típicos de la Biomasa	27
Tabla 3.Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca)	34
Tabla 4.Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal y vegetal.	34
Tabla 5.Clasificación de sustratos para la digestión anaeróbica	35
Tabla 6.Producción de biogás por tipo de residuo animal	36
Tabla 7.Producción de biogás a partir de residuos vegetales	36
Tabla 8.Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos	37
Tabla 9.Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural	37
Tabla 10.Rangos de Temperatura y Tiempo de Fermentación Anaeróbica	39
Tabla 11.Datos Físicos de Jerusalén	42
Tabla 12.Equipos	46
Tabla 13.Resultados FOS/TAC	46
Tabla 15.Medición de Temperatura	48
Tabla 16.Datos del ensayo	50
Tabla 17.Resultados	50
Tabla 18.Componentes presentes en espectro de masa	51
Tabla 19.Resultados obtenidos en el diagnóstico	58
Tabla 20.Alternativas no implementadas	61

Tabla 21.Presentación de Alternativas	62
Tabla 22.Escala cualitativa	63
Tabla 23.Escala Cuantitativa	63
Tabla 24.Resultados análisis multicriterio	64
Tabla 25.Resultados FOS/TAC biodigestor antes y después de las mejoras	67
Tabla 26.Resultados pH biodigestor con	68
Tabla 27.Resultados	70
Tabla 28.Datos obtenidos	72
Tabla 29.Valores promedios aproximados de la relación C/N de los residuos presentes en el hogar	73
Tabla 30.Comparación de parámetros actuales con respecto a bibliográficos	74
Tabla 31. CAPEX	82
Tabla 32. OPEX	82
Tabla 33.Tendencia anual consumo de gas Tocaima(Cundinamarca)	85
Tabla 34.Flujo de caja sin proyecto	85
Tabla 35 .Flujo de caja con proyecto	85
Tabla 36.Flujo de caja beneficio	86

LISTA DE GRÁFICAS

	pág
Grafica 1.Producción de biogás según tipo de materia orgánica	36
Grafica 2.Producción de biogás en función de la temperatura	39
Grafica 3.Composición de biogás en función de pH de la mezcla de materias primas	40
Grafica 4.p H en biodigestor de diagnóstico	47
Grafica 5.Espectro de masas muestra 1	51
Gráfica 6.Espectro de masas duplicado	52
Grafica 7.Resultados pH biodigestor con mejoras	69
Grafica 8.Comparación de Porcentaje de Metano	71
Grafica 9.Flujo de caja total	86

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1.Estructura de un biodigestor	22
Figura 2.Biodigestor tipo globo.	23
Figura 3.Biodigestor de domo fijo	24
Figura 4.Biodigestor de domo flotante	24
Figura 5.Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica	32
Figura 6.Descripción del proceso	45
Figura 7.Muestreo del biogás	49
Figura 8.Cromatógrafo TSO QUANTUM XLS	49
Figura 9.Jeringa de inyección	49
Figura 10. Procedimiento de mezclado para obtener la carga	56
Figura 11.Conexiones, tuberías y sistema de drenaje	57
Figura 12.Tanque de operación, tubo de alimentación, tubo de agitación	57
Figura 13.Tubo de agitación con mejora	66
Figura 14.Implementación de empaques	67
Figura 15.Prueba de llama	72
Figura 16.Diagrama de proceso	77

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1.Determinación de	pág 38
Ecuación 2.Determinación	38
Ecuación 3.Carga de alimentación	54
Ecuación 4.Producción	55
Ecuación 5.Relación C/N	74
Ecuación 6.Expresión	74
Ecuación 7.Densidad	76
Ecuación 8.Carga de alimentación	77
Ecuación 9.Calculo de la TIO	83
Ecuación 10.kilogramos de gas en un cilindro	84
Ecuación 11.Cálculo VPN	86
Ecuación 12. Relación B/C	87

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Metodología cromatografía de gases	96
Anexo B. Cromatografía de gases	97

GLOSARIO

AGITACIÓN: forzar un fluido con ayuda de un medio mecánico, con el fin de generar un movimiento circulatorio en el interior del recipiente.¹

BIODIGESTOR: es un recipiente de gran tamaño, hermético e impermeable (conocido como reactor), donde se deposita materia orgánica con una cantidad de agua establecida, en esta mezcla se presenta fermentación anaerobia por acción de microorganismos, que luego de la degradación se obtiene como producto final gas metano.²

BIOGÁS: mezcla de gas producido por bacterias metano génicas que transforman material biodegradable en condiciones anaerobias. Sus componentes principales son del 60%-80% metano, 30%-40% dióxido de carbono y trazas de otros gases.³

BIOMASA: materia orgánica proveniente del reino vegetal o animal, incluyendo residuos y desechos orgánicos, que pueden ser aprovechados energéticamente.⁴

CROMATOGRÁFIA DE GASES: técnica mediante la cual la muestra se volatiliza y se inyecta en una columna cromatográfica, la elución se produce por el flujo de una fase móvil de gas inerte.⁵

DIGESTIÓN ANAERÓBIA: el tratamiento anaerobio es un proceso microbiológico en ausencia de oxígeno, en el que la materia orgánica se transforma por acción de microorganismos en biogás y bioabono.⁶

EFLUENTES: descargas de origen residual provenientes de procesos industriales, así como de vertidos originados por diversos usos de agua residual que son evacuados a cualquier destino fuera de la industria.⁷

ESPECTROMETRIA DE MASAS: técnica que permite analizar compuestos de diversa naturaleza ya sea inorgánica, orgánica o biológica logrando obtener información cualitativa y cuantitativa.⁸

¹[Anónimo].Agitación y mezcla de fluidos. Proyecto Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Cuautitla.2017.35 p.

² ZUÑIGA, Iván. Biodigestores. Tipos de biodigestores. Monografía para optar por el título de ingeniero mecánico. Hidalgo. Universidad Autónoma de estado de Hidalgo 2007.69 p.

³[Anónimo]. Ecobiogas. Especialistas en planta de biogás. Disponible en: http://www.ecobiogas.es/archivos/es/biogas_biogasienergia.php

⁴ [Anónimo].Plantas de biomasa. ¿Qué es la biomasa?

⁵ PEREZ. Laura Patricia. MAGADA, Héctor. Método de biotecnología: Cromatografía de gases..2004.

⁶ Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE).Digestión anaerobia. Proceso de producción de biogás.BiodiSol.2017.Disponible en:<http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-producción-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/>

⁷SPINELLI, Mónica. Efluentes. Disponible en: <https://goo.gl/z5raev>.

⁸ LABORATORIO DE TECNICAS INSTRUMENTALES. Espectrometría de masas.2016

ESTIERCOL: Heces fecales de los seres vivos. en general, el estiércol posee un contenido de sólidos del 8% AL 25% dependiendo del tipo de ser vivo.⁹

METANO: es un hidrocarburo, clasificado como el más sencillo, su fórmula química es CH_4 . y se obtiene de la digestión anaerobia.¹⁰

pH: está en función de la concentración de CO_2 en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima.¹¹

RELACIÓN C/N: los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por Carbono (C) y también contienen Nitrógeno (N), entonces se establece la relación entre ellos (C/N), la cual influye sobre la producción de gas.¹²

RELACIÓN FOS/TAC: es la relación entre ácidos orgánicos volátiles y la capacidad de compensación alcalina, es considerada como una medida de riesgo en una planta de biogás ya que determina la acidificación.¹³

SÓLIDOS TOTALES: son materias que se encuentran disueltas y suspendidas en el agua, cuya determinación depende de la temperatura y el tiempo de desecación.¹⁴

SOLIDOS VOLÁTILES: se considera como la porción de materia orgánica que puede ser eliminada o volatilizada, cuando es quemada en una mufla a una temperatura de 550 °C.¹⁵

⁹ PEREZ, Julián. Definición. de: Definición de estiércol.2017 Disponible en <https://goo.gl/Bz6SKf>

¹⁰ MELENDI, Daniel. Metano. Disponible en: <https://goo.gl/uEcB9X>

¹¹ [Anónimo].Concepto. de: Concepto de pH Disponible en <http://concepto.de/ph/>

¹² FUNDACION PARA EL DESARROLLO SOCIECONOMICO Y RESTAURACION AMBIENTAL. La relación C/Disponible en : <https://goo.gl/m6J5d6>

¹³ CORPORACION AUTONOMA REGIONAL. Determinación de la relación FOS/TAC para una planta de biogás por titulación ácida. Bogotá: 2017, 13 p.

¹⁴ [Anónimo].Carbotécnia. Sólidos totales disuelto.2014.Disponible en: <https://goo.gl/zRRCmx>

¹⁵ OBSERVATORIO DE SALUD Y MEDIO AMBIENTE DE ANDALUCIA. Solidos Volátiles. Disponible en: <http://www.osman.es/diccionario/definicion.php?id=14067>

RESUMEN

La generación de energía a partir de fuentes consideradas limpias se encuentra en auge en la actualidad, debido a que el consumo y explotación de combustibles fósiles es una de las principales causas de la contaminación a la que se enfrenta nuestro planeta tierra, por lo tanto el presente trabajo está enfocado en establecer alternativas de mejora al sistema de biodigestión anaerobio, ubicado en ciertas fincas administradas por las familias de la vereda el hatillo a 7 Km aproximadamente del municipio de Jerusalén. Esto surgió como parte de un plan piloto de la Corporación Autónoma Regional para hacer de Jerusalén el primer municipio ecosostenible de Cundinamarca, generando biogás de mejor calidad a través del análisis en el aumento principalmente del contenido de metano en el gas obtenido con el objetivo de crear energías renovables limpias y de esta manera contribuir a la disminución de la contaminación ambiental y eventualmente gastos económicos.

Para llevar a cabo el objetivo, inicialmente se evaluaron y analizaron las condiciones de operación para el sistema que correspondía a un tanque de $1m^3$ (IBC) que ya se encontraba instalado y además siendo operado por una sola familia de la vereda ya mencionada, para posteriormente realizar el mismo procedimiento al biodigestor con las mejoras implementadas. Se realizaron pruebas de laboratorio al estiércol como relación FOS/TAC, pH y al biogás se le realizó una cromatografía de gases, detectando los gases presentes y cuantificando la cantidad de metano generado en ambos casos (diagnóstico y post implementación), arrojando para el diagnóstico un porcentaje de metano alrededor del 45% y para la mejora un porcentaje alrededor del 53% contenido de metano; con lo que se establece un aumento cercano al 8% desde el diagnóstico a la implementación de la mejora seleccionada.

Se realizó la implementación de mejoras en el sistema de biodigestión, se evaluó la producción de biogás por medio de una cromatografía de gases permitiendo conocer la composición del biogás generado por cada sistema para compararlos y poder concluir con un análisis acerca de la influencia de dichas mejoras en la calidad del biogás producido.

PALABRAS CLAVE: Biodigestor, Biogás, Estiércol, Gas metano, energías renovables, reactor anaeróbico.

INTRODUCCIÓN

Las energías renovables contribuyen a la reducción del uso de combustibles fósiles y fuentes no renovables, que día a día se agotan y desencadenan mayor contaminación en el medio ambiente. La necesidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero especialmente dióxido de carbono (CO₂) y la creciente necesidad de implementar alternativas para producción de energías limpias, genera como resultado una compensación económica y ambiental para el planeta.¹⁶

Millones de toneladas de residuos agrícolas son producidos en diferentes ambientes donde no se les da un uso relevante; sin tener en cuenta los diversos estudios que revelan que las digestiones anaeróbicas de estos desechos pueden servir como alternativa para la reducción del daño ambiental, su eficiencia, y calidad generan una alta cantidad de biogás. La digestión de los residuos consiste en la hidrolización y fermentación haciendo uso de bacterias acidogénicas y bacterias metanogénicas para finalmente producir gas metano, que posteriormente se puede transformar en fuente de energías alternativas, como la eléctrica o la térmica, entre otras.

El uso de energías limpias en veredas de municipios como Jerusalén ayuda a la reducción de enfermedades causadas por el humo proveniente de la quema y tala de árboles, así como los daños que se dan por los gases de efecto invernadero; sin dejar de lado la importancia de reemplazar la leña debido a las repercusiones que conlleva el uso de ésta en la población. El presente trabajo considera la digestión anaerobia a partir de residuos provenientes del ganado vacuno encontrados en la finca de la familia en cuestión y que se hará cargo de dicho biodigestor, mediante el análisis de mejoras implementadas al sistema ya en funcionamiento. Así pues, puede establecerse la influencia de cada uno de los parámetros operacionales en el proceso de biodigestión y la generación de biogás de alta calidad.

¹⁶ BERNAL, Daniela, QUINTERO, Daniela. Desarrollo de una propuesta para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el Recodo .Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías.2016.111p.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Plantear una propuesta de mejora del proceso de producción de biogás en el biodigestor ubicado en Jerusalén (Cundinamarca).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual de la producción de biogás en la planta.
- Seleccionar una alternativa adecuada que ayude en la mejora del proceso de digestión.
- Determinar especificaciones técnicas de la alternativa seleccionada.
- Analizar el costo-beneficio de la alternativa seleccionada.

1. GENERALIDADES

La digestión anaeróbica requiere de diferentes conceptos y teorías para comprender la actividad microbiana como principio de funcionamiento que permitirán realizar las pertinentes mejoras al sistema de biodigestión ya especificado.

1.1 BIODIGESTORES

Es un contenedor de cualquier forma, tamaño o material y además hermético donde se lleva a cabo la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas como producto. El biodigestor cuenta principalmente con la entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula para el biogás y una salida para el material que ya ha sido procesado.¹⁷

Los elementos que comúnmente integran un biodigestor son:

- **Cámara de fermentación:** Lugar de almacenamiento de la biomasa durante el proceso de descomposición.¹⁸
- **Cámara de almacén de gas:** Lugar donde se lleva a cabo la acumulación del biogás antes de ser extraído.¹⁹
- **Pila de carga:** Entrada de la biomasa.²⁰
- **Pila de descarga:** La salida, sirve para retirar los residuos que ya están gastados y no son útiles para el biogás.²¹

¹⁷ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

¹⁸ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

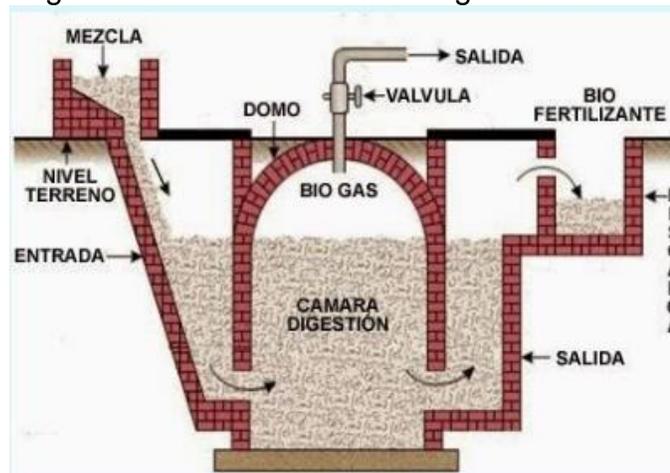
¹⁹ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

²⁰ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

²¹ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

- **Agitador:** mover los residuos que están en el fondo hacia la parte superior del biodigestor para aprovechar toda la biomasa.
- **Tubería de gas:** La salida del biogás. Se puede conectar a una estufa o se puede transportar por medio de la misma tubería a su lugar de aprovechamiento.

Figura 1. Estructura de un biodigestor



Fuente: MOORE, Carolina. Biodigestor: estructura de un biodigestor. México.[en línea], disponible en: <http://biodigestor33.blogspot.com.co/2014/11/estructura-de-un-biodigestor.html>. Recuperado 10 septiembre de 2017.

1.2 GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL MUNDO

Los países con más generación de energía a partir de biogás en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU, Filipinas y Alemania, cuyas plantas de tratamiento de desechos industriales han tenido una importante evolución, siendo difundidas para determinados fines en combinación con tratamientos aeróbicos convencionales. Estos reactores anaerobios son de enormes dimensiones (más de 1000 m³ de capacidad), trabajan a temperaturas mesófilas (20 a 40 °C), poseen sofisticados sistemas de control y por lo general están conectados a equipos de cogeneración, que brindan como productos finales: calor, electricidad y un efluente sólido de alto contenido proteico que servirá como fertilizante o alimento de animales.²²

²² MIGLIAVACCA, Julieta. Tratamiento anaeróbico de efluentes cítricos con captación de biogás para la reducción de gases de efecto invernadero. Tesis para la obtención de magister en ingeniería ambiental. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Tucuman. 2011. 158 p.

1.3 TIPOS DE BIODIGESTORES

Existen tres tipos de plantas básicas de biogás (plantas de globo, de domo fijo y plantas de tambor flotante).

1.3.1 Plantas de globo. Este tipo de plantas tiene en la parte superior una bolsa que funciona como almacenamiento de gas y del mismo modo la entrada y salida se encuentran en la misma superficie de la misma. El bajo costo, fácil transportación, poca sofisticación de construcción entre otras, son las grandes ventajas de este tipo de biodigestores. Aunque el corto tiempo de vida, la baja generación de empleo y la alta susceptibilidad al daño también suelen ser las desventajas más frecuentes para este tipo de biodigestores.²³

Figura 2. Biodigestor tipo globo.



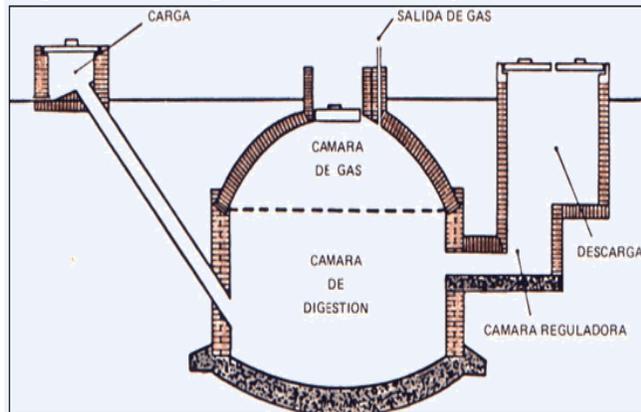
ZUÑIGA, Iván. Biodigestores. Tipos de Biodigestores. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo 2.007.69 p.

1.3.2 Plantas de domo fijo. Está conformado por una cámara de gas, cuyos materiales de construcción pueden ser ladrillos o piedras. El domo y los fondos son esféricos y unidos por lados rectos. El gas generado es guardado bajo el domo.²⁴

²³

²⁴ MANNISE, Raúl. Biodigestores. [En línea].2011. Citado el 21 de Septiembre de 2017]. Disponible en internet : <https://ecocosas.com/energias-renovables/biodigestor/>

Figura 3. Biodigestor de domo fijo

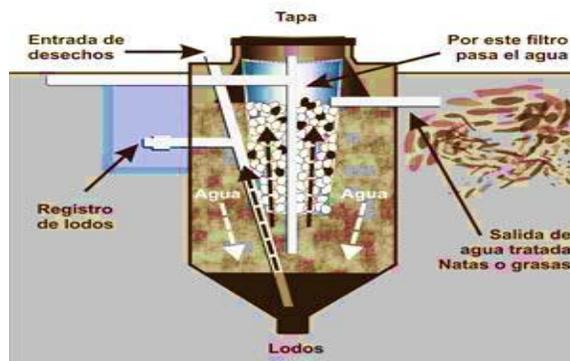


Fuente: LOPEZ, Bárbaro. Análisis en biodigestores.[En línea], disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo04.htm>
Recuperado 10 septiembre de 2017.

1.3.3 Plantas de domo flotante. Como su nombre lo indica, es un tanque subterráneo y el recipiente móvil para el almacenamiento de gas. Esta última flota ya sea sobre la mezcla de fermentación o sobre una chaqueta de agua. El lugar donde el gas es recolectado puede levantarse o bajar dependiendo de la cantidad de gas almacenado. Su operación simple y de fácil entendimiento son las principales ventajas, y como desventajas a este sistema de biodigestión están los altos costos de los materiales y la susceptibilidad a la corrosión de las partes hechas en acero debido al contacto con resinas cementadas y cenizas cementadas con el agregado de diferentes tipos y concentraciones de especies agresivas (cloruro y sulfato).²⁵

Figura 4. Biodigestor de domo flotante

Biodigestor clarificador prefabricado
(esquema de la descripción general)



Fuente: PAREDES, Alfredo. Mercadotecnia. Biodigestores, Perú. Disponible en: <https://goo.gl/MZTH9o>. Recuperado 10 septiembre de 2017.

²⁵ ZUÑIGA, Iván .Biodigestores .Tipos de Biodigestores. Monografía para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Hidalgo. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo 2007.69 p.

1.4 BIOGÁS

Se considera como un combustible generado en dispositivos específicos por medio de reacciones de biodegradación que sufre la materia orgánica, por medio de microorganismos, así como de otros factores en ausencia de aire. Principalmente está formado por un 29% de dióxido de carbono (CO_2), 60% de metano (CH_4), y otros gases, pero en cantidades menores a las anteriores.²⁶

De los gases mencionados, el metano presenta una gran relevancia debido a que sirve como combustible. Se produce gracias a que las bacterias anaeróbicas pueden alimentarse principalmente de materia orgánica; que puede ser formada ya sea por desechos agrícolas, estiércol, desechos municipales, desechos vegetales, etc.

1.4.1 El biogás y sus componentes. También conocido como gas de digestión o normalmente nombrado metano (CH_4), es obtenido a partir de la fermentación de materia orgánica, es decir estiércol, lixiviados y cualquier tipo de material biodegradable en ausencia de oxígeno.

Como menciona Javier Pérez Medel²⁷, el biogás posee grandes ventajas, siendo la energía obtenida compatible con el desarrollo sostenible, es decir “limpia”. Los residuos resultantes de la fermentación son aprovechados como fertilizantes biológicos, además se logra la eliminación de residuos de origen animal y en algunos casos humanos.

Actualmente el biogás tiene varios usos alrededor del mundo, buscando alternativas energéticas de origen renovable y la disminución de gases de efecto invernadero generados por la descomposición de residuos orgánicos, lo cual convierte al biogás en una alternativa posible para el reemplazo de combustibles fósiles, además un aprovechamiento significativo principalmente en zonas rurales.

A continuación, pueden observarse diferentes propiedades de un tipo estándar de biogás.

²⁶ LUDWING, Victoria. Manual del usuario modelo colombiano de biogás. Washington. 2009. 37 p.

²⁷ MEDEL, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Componentes presentes en el biogás y sus efectos. Memoria para optar el título de ingeniero civil mecánico. Santiago de Chile. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. 2010. 83 p.

Tabla 1. Propiedades de una composición estándar de biogás

Composición	55-70% metano
	30-45% Dióxido de carbono
	Trazas de otros elementos
Energía contenida	6,0-6,5 Kwh./m ³
Equivalente en combustible	0,6-0,65 L _{petróleo} /m ³ biogás
Límite de explosión	6-12% biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750°C (según metano contenido indicado)
Presión Crítica	75 89 bares.
Temperatura Crítica	-82.5°C
Densidad Normal	1,2 Kg./ m ³
Olor	Huevos en mal estado
Masa Molar	16,043 Kg./kmol

Fuente: MEDEL, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Santiago de Chile. [en línea] Disponible en: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-perez_jm/pdfAmont/cf-perez_jm.pdf. Recuperado 10 septiembre de 2017.

1.5 BIOMASA

Término que hace referencia a la materia viva producida por plantas, animales, hongos o bacterias en un área determinada. Se suele utilizar para hacer referencia al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de estos recursos biológicos. Se considera como una fuente renovable por su valor, que proviene de la energía proporcionada por el sol a través de la fotosíntesis donde se captura la energía, toma el dióxido de carbono presente en el ambiente y agua proveniente de los suelos, transformándolos en carbohidratos, para de esta manera formar la materia orgánica.

Es la utilización de materia orgánica obtenida de residuos agrícolas, forestales, aguas residuales, residuos sólidos urbanos e incluso algunos residuos derivados del sector industrial como fuente de energía, principalmente caracterizada por su heterogeneidad, origen y naturaleza. Con el paso del tiempo se han logrado desarrollar procesos que permiten la transformación de la biomasa de manera eficiente, conveniente y sin generar mayor impacto ambiental, convirtiéndola en combustibles ya sean líquidos o gaseosos que pueden utilizarse con gran facilidad en el desarrollo industrial que se presenta en el mundo.²⁸

²⁸ FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL .Manuales de energías renovables: Biomasa. El recurso biomásico. 1ra Edición. San José Costa Rica. 2002.56 p.

1.6 FUENTES Y CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

1.6.1 Tipos de Biomasa. Los recursos están presentes en diversos estados que determinan la factibilidad de los procesos de conversión que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo; los residuos forestales involucran combustión directa, los residuos animales de procesos anaeróbicos y así cada tipo de residuo tendrá características que se deben evaluar exhaustivamente para determinar qué proceso es más conveniente.²⁹

Tabla 2 : Estados Típicos de la Biomasa

Recursos de Biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. Restos de plantaciones: Ramas, corteza, raíces.	Polvo HR>50% Polvo sólido, HR 30-45% Sólido HR >55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales. Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café, estiércol) Residuos de cosechas: tallos y hojas, cascaras, maleza, pastura.	Sólido, alto contenido humedad Polvo, HR< 25% Sólido, alto contenido humedad Solido HR> 55%
Residuos Industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales. Residuos de procesamiento de carnes. Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales. Grasas y aceites vegetal	Sólido, humedad moderada humedad Líquido, gaseoso
Residuos Urbanos	Aguas negras Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales) Basura orgánica(madera)	Líquido Sólido, alto contenido humedad Solido alto contenido humedad

Fuente: FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL. Manuales de energías renovables: Biomasa.1ra Edición. Costa Rica. Recuperado 21 de septiembre de 2017.

²⁹ FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL .Manuales de energías renovables: Biomasa. El recurso biomásico. 1ra Edición. San José Costa Rica. 2002.56 p.

1.6.1.1 Biomasa Natural. Este tipo de biomasa es aquella que se genera en ecosistemas naturales, donde el hombre no presenta intervención, se produce de manera espontánea en los bosques, selvas, matorrales y en general en todo lugar donde se encuentre fauna. La leña y las ramas son un claro ejemplo de este tipo de biomasa, usada por el hombre para satisfacer sus necesidades. El problema que presenta este tipo de biomasa es la necesaria gestión de la adquisición y transporte del recurso al lugar de utilización. Esto puede provocar que la explotación de esta biomasa sea inviable económicamente y a su vez genere un impacto ambiental debido a la explotación masiva de los recursos naturales.³⁰

1.6.1.2 Biomasa Residual. Es aquella que se genera a partir de actividades realizadas por el hombre que generan residuos provenientes de la ganadería, agricultura (leñosos y herbáceos), forestales y en algunos casos en la industria agroalimentaria y que todavía pueden ser utilizados y considerados subproductos. Este tipo de biomasa es considerado ventajoso debido a que no genera contaminación, no afecta los ecosistemas y los costos de transporte y producción son relativamente bajos.³¹

Se clasifica en:

- SECA: Son subproductos no utilizados en actividades de origen agrícola, forestales, ni industrias agroalimentarias o madereras, un ejemplo de este tipo de biomasa es el aserrín, la cáscara de almendra, el orujillo, las podas de frutales, etc.³²
- HÚMEDA: Se considera biomasa húmeda a flujos “vertidos biodegradables” residuales que resultan de actividades de origen animal o humano, que se dan en industrias, ciudades, instalaciones agropecuarias etc. Un ejemplo de este tipo de biomasa es: aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (principalmente purines).³³

1.6.1.3 Cultivos Energéticos. Son cultivos de grandes plantaciones ya sea de árboles o plantas destinadas específicamente a la producción de energía, dichas plantas tienen ciertas características en cuanto a crecimiento, siendo mucho más rápido que en un cultivo normal y a mantenimiento por su bajo costo, el tiempo de cosecha posee una variación aproximada entre tres a diez años, con frecuencia estas plantaciones se realizan en terrenos de bajo valor productivo.

³⁰ BERDASCO, Lorena. Tipos de biomasa. [en línea]. Recuperado en 12 de agosto de 2017. Disponible en :< <https://www.certicalia.com/blog/tipos-de-biomasa>>

³¹ BERDASCO, Lorena. Tipos de biomasa. [en línea]. Recuperado en 12 de agosto de 2017. Disponible en :< <https://www.certicalia.com/blog/tipos-de-biomasa>>

³² GARRIDO, Santiago. Centrales termoeléctricas de biomasa. Tipos de biomasa. Madrid. 2009. 19 p.

³³ GARRIDO, Santiago. Centrales termoeléctricas de biomasa. Tipos de biomasa. Madrid. 2009. 19p.

Cultivos de uso agrícola también son utilizados para la generación de energía entre ellos se encuentran: la caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, plantas oleaginosas como la palma de aceite, girasol y soya.³⁴

Entre los cultivos energéticos que se utilizan para la obtención de biomasa están:

- **CULTIVOS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA:** Poseen características apropiadas para producir calor mediante combustión directa, con lo que son útiles en desecación y generación de vapor.
- **CULTIVOS QUE SE OBTIENEN EN ESTADO LÍQUIDO:** Pueden ser usados como carburantes en motores de combustión interna.
- **CULTIVOS DE SEMILLAS OLEAGINOSAS:** En este grupo se encuentran los cultivos de colza, soja, palma y girasoles utilizados en la producción de aceites vegetales, para uso como carburantes mejor conocidos como biocarburantes.³⁵

1.7 RELACIÓN FOS/TAC

Una planta de biogás funciona de manera más eficaz cuando se agregan sustratos en las cantidades adecuadas y totalmente adaptadas al proceso de fermentación, para esto es necesario conocer con exactitud y evaluar durante un tiempo prolongado, el estado exacto de la fermentación dentro del digestor.

Esto puede conseguirse mediante análisis periódicos y sencillos de realizar como la relación FOS/TAC, mediante la cual, se obtiene información exacta de las características de biodegradación del digestor y por lo tanto de la producción de biogás. Por medio de este análisis toda interferencia en el proceso puede detectarse de manera rápida y eliminar de forma específica. De esta manera la planta tiene una gestión más eficaz y con una mejor relación calidad-precio.

Se desarrolló un análisis FOS/TAC, con el fin de determinar la concentración acida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación. Se realizó mediante un test de valoración (Método Nordmann), a cargo del Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL). Donde FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/l. TAC significa Totales Anorganisches Carbonat, esto es, carbonato inorgánico total, y se mide en mg CaCO₃/l. Esta relación, es reconocida

³⁴ FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL. Manuales de energías renovables: Biomasa. El recurso biomásico. 1ra Edición. San José Costa Rica. 2002. 56 p.

³⁵ [Anónimo]AMT INGENIERIA.Biomasa.2012.Disponible en: <http://www.amt-solar.com/>

como el valor con el cual se evalúa el proceso de fermentación, y de esta manera poder detectar problemas en el proceso a tiempo.³⁶

1.7.1 Determinación relación FOS/TAC. Esta relación puede ser realizada mediante una valoración manual, o de manera más fácil y rápida por medio de un valorador como el TIM 840, el uso de este equipo permite una medición más precisa y ahorra varios minutos por muestra.

La muestra de sustrato es valorada con H_2SO_4 0,1 N hasta pH 5, el valor gastado es registrado en ml, nuevamente se adiciona H_2SO_4 0,1 N de pH 5 hasta pH 4,4 registrando el valor de ácido agregado en ml. El valor calculado resultante según las fórmulas matemáticas indicará el valor de la relación FOS/TAC.³⁷

Fórmulas de cálculo:

Cantidad de sustrato 20 ml

Ácido Sulfúrico: 0,1N (0,05 mol/l)

TAC=Volumen de H_2SO_4 añadido desde el principio hasta pH en ml x 250

FOS= (Volumen de H_2SO_4 añadido de pH 5 hasta pH 4,4 ml x 1,66 – 0,15) x 500³⁸

Importante: Si la cantidad de sustrato o la concentración de ácido no son las de arriba indicadas, debe modificarse la fórmula como corresponda. La fórmula correcta está programada en el valorador TIM 840/845 de HACH LANGE y los valores visualizados se pueden aceptar tal como son, lo que quiere decir que no se requiere de conversión.

1.7.2 Uso de la relación FOS/TAC. Una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 es normal, aunque cada planta tiene su propio valor óptimo, el cual sólo puede determinarse mediante una observación a largo plazo y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato. Para el caso de las plantas que utilizan materias primas renovables requieren una relación FOS/TAC de 0,4 a 0,6, donde los valores por debajo de 0,4 indican que la carga de biomasa es muy baja y valores mayores a 0,6 indican la excesiva sobrealimentación de la carga en el biodigestor. Cuando existe peligro de colapso en el proceso, es decir descompensación en la carga adecuada, muerte microbiana entre otros, se generan muchos costos, además de varias semanas sin producción de gas y una cantidad rigurosa de trabajo

³⁶ LESSIE, Ulrich; PUTZ, Pietra. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Wambeln. Recuperado en 12 Noviembre de 2017.

³⁷ CORPORACION AUTONOMA REGIONAL. Determinación de la relación FOS/TAC para una planta de biogás por titulación ácida. Bogotá: 2017, 13 p.

³⁸ LESSIE, Ulrich; PUTZ, Pietra. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Wambeln. Recuperado en 12 Noviembre de 2017.

para compensar los daños causados y para que la planta vuelva a su proceso normal de operación.³⁹

1.8 FUNDAMENTOS DE LA FERMENTACION METANOGÉNICA

1.8.1 Etapas de la fermentación metanogénica. Este proceso suele ser muy complejo por las reacciones que se llevan a cabo como por la cantidad de microorganismos involucrados en las mismas. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta el momento, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

1. Hidrólisis.
2. Etapa fermentativa o acidogénica.
3. Etapa acetogénica.
4. Etapa metanogénica.

1.8.1.1 Hidrólisis. Primera etapa de generación de biogás, en la cual los compuestos complejos del material inicial (carbohidratos, grasas y proteínas) se dividen en compuestos orgánicos mucho más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos). En esta etapa las bacterias hidrolíticas liberan enzimas que descomponen el material por medios bioquímicos.⁴⁰

1.8.1.2 Etapa Fermentativa o Acidogénica. Etapa donde los productos intermedios formados en la hidrólisis se dividen por medio de bacterias fermentadoras para formar ácidos (acético, propionico, y butírico) junto con dióxido de Carbono e Hidrógeno. La naturaleza de los productos que se forman en esta etapa es relacionada por la concentración del Hidrógeno intermedio.⁴¹

1.8.1.3 Etapa Acetogénica. Los productos formados se convierten en precursores de biogás (ácido acético, Hidrógeno y dióxido de Carbono) por medio de bacterias acetilénicas. En esta etapa es muy importante la presión parcial del Hidrógeno. Así como tener un contenido de hidrógeno excesivamente alto impide la conversión de los productos intermedios de la acidogénesis por razones relacionadas con la energía.⁴²

³⁹ LESSIE, Ulrich; PUTZ, Pietra. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Wambeln. Recuperado en 12 Noviembre de 2017.

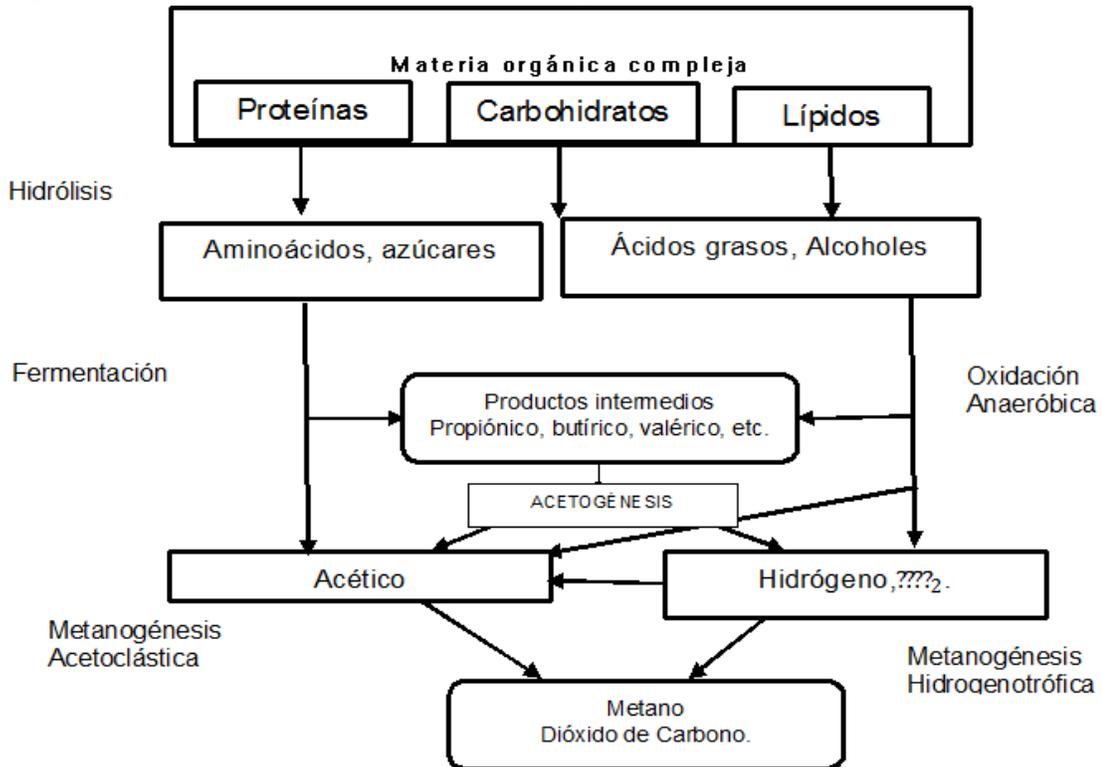
⁴⁰ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

⁴¹ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

⁴² ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de

1.8.1.4 Etapa Metanogénica. Etapa final de generación de biogás, donde se convierte el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono en metanos por medio de microorganismos metanogénicos específicamente anaeróbicos.⁴³

Figura 5. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica



Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

1.9 MICROORGANISMOS INVOLUCRADOS EN CADA FASE DE DIGESTIÓN ANAEROBICO

1.9.1 Bacterias en la hidrólisis. En esta fase las bacterias catabolizan sacáridos, proteínas, lípidos y otros contribuyentes menores de biomasa, pueden destacarse: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propioni- bacterium*, entre otras.⁴⁴

construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

⁴³ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

⁴⁴ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011. 24 p.

1.9.2 Bacterias en la acidogénesis. Fase donde las bacterias son productoras de Hidrógeno y catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros. Las más dominantes en esta fase son: *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus*.⁴⁵

1.9.3 Bacterias en la acetogénesis. Estas bacterias catabolizan compuestos mono carbonados y/o hidrolizan compuestos multicarbonos hacia la producción de ácidos acéticos.⁴⁶

1.9.4 Bacterias en la metanogénesis. Catabolizan acetatos compuestos monocarbonados para producir metano, contemplándose solo cuatro géneros.⁴⁷ Están representadas principalmente por: *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii*, y *Methanosarcina*.

1.10 FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGAS

Al ser la digestión anaerobia un proceso bioquímico complejo, es de vital importancia mantener las condiciones óptimas que permitan la realización tanto de las reacciones químicas dentro del reactor, así como las reacciones bioquímicas intracelulares que dan vida a los organismos que llevan a cabo dicho proceso.

1.10.1 Naturaleza y composición de materias primas. Los diferentes residuos orgánicos para llevar a cabo la fermentación pueden ser de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico entre otros; pero es indispensable tener en cuenta las características bioquímicas que tienen, deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana dentro del sistema anaeróbico. Es de vital importancia la presencia de fuentes de energía y carbono, así como sales minerales.⁴⁸

Por tal motivo son recomendados los estiércoles y lodos producidos en plantas de tratamientos de aguas residuales pues presentan carbono y sales minerales en proporciones adecuadas, además la degradación de estos depende del tipo de animal y de la alimentación recibida.

Los principales grupos de componentes orgánicos que presentan estos residuos son: carbohidratos (50% del total de la materia orgánica seca), compuestos nitrogenados (20%), lignina (10 a 40%) y el resto fracciones como: cera, resinas, grasas.⁴⁹

⁴⁵ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011. 24 p.

⁴⁶

⁴⁷FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL .Manuales de energías renovables: Biomasa. El recurso biomásico. 1ra Edición. San José Costa Rica. 2002.56 p.

⁴⁸ HILBERT, Jorge. Manual para la producción de biogás. Institución de Ingeniería rural. Castelar.

⁴⁹ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011. 29 p.

Tabla 3. Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca)

Materia Prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
Paja de trigo	1,10	2,10	65,45	21,60	3,53
Caña de Maíz		4,50	35,40	10,30	6,50
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,50	10,95	32,39	21,49	23,67

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

Y los minerales presentes como calcio, potasio, magnesio, fósforo, azufre y elementos traza son del orden de 1 a 10% de peso seco, presentados en la siguiente tabla.⁵⁰

Tabla 4. 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	0,3-0,2	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
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

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

De acuerdo a lo anterior pueden clasificarse los sustratos en cuatro clases en función del porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), y demanda química de Oxígeno (DQO), con las posibles alternativas en cuanto al tipo de digestor a utilizar.

⁵⁰ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 30 p.

Tabla 5. Clasificación de sustratos para la digestión anaeróbica

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	1	Basura doméstica, estiércol sólido, restos de cosecha	>20%ST 40-70% Fracción orgánica
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces animales	100-150g/l DQO 5%-10% ST 4%-8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos(SS)	3	Heces animales de cría y levante diluido con agua de lavado, aguas residuales de ataderos	3-17 g/l DQO 1-2 g/l SS
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias Aguas negras	5,18 g/l DQO 4-500 g/l DQO

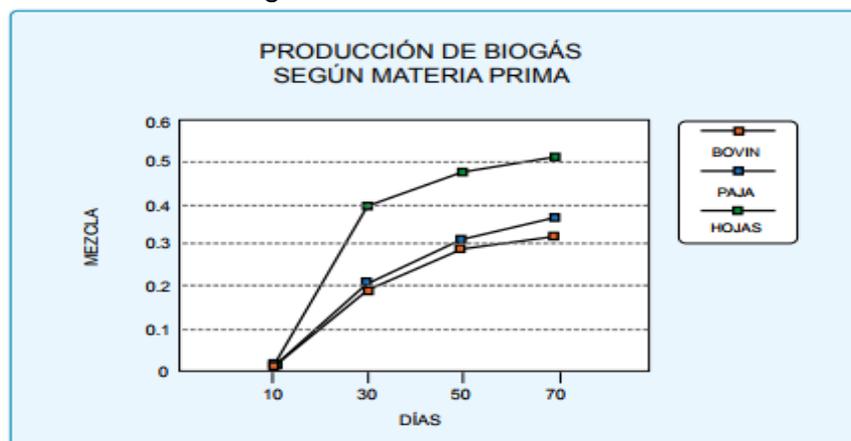
Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

- Los sustratos de clase 1 donde se encuentran basuras domésticas y estiércol sólido pueden degradarse eficientemente en digestores tipo batch o por lotes.
- Los sustratos de clase 2 son degradados de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua.
- Los sustratos de clase 3 al tener una mayor dilución y en consecuencia un DQO menor, deben tratarse con digestores de alta eficiencia como los de filtro anaerobio.
- Los sustratos de clase 4, debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia.

Las fuentes carbonadas de preferencia por los microorganismos son los glúcidos o carbohidratos, los cuales son degradados por distintas rutas metabólicas, dando origen a cadenas carbonadas que forman nuevas células microbianas y al mismo tiempo son utilizadas en oxidaciones y reducciones biológicas que están ligadas a la producción de moléculas ricas en energía. Estos procesos pueden llevarse a cabo en lugares donde el oxígeno es ilimitado que corresponde a procesos de oxidación biológica, o donde el nivel de oxígeno es bajo dando lugar a fermentaciones. Finalmente, entonces según la composición bioquímica y naturaleza de las materias primas a usar en el proceso de biodigestión se determina una dinámica de producción de biogás.⁵¹

⁵¹ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 30 p.

Grafica 1. Producción de biogás según tipo de materia orgánica



Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

Tabla 6. Producción de biogás por tipo de residuo animal

Estiércol	Disponibilidad Kg/día*	Relación C/N	Volumen de Biogás	
			m ³ /kg húmedo	m ³ /día/año
Bovino(500 kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

Tabla 7. Producción de biogás a partir de residuos vegetales

Residuos	Cantidad residuo Ton/ ha	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m ³ /Ton	m ³ /ha
Cereales(paja)				
Trigo	3.3	123:1	367	1200
Maíz	6.4	45:1	514	3300
Leguminosas(paja)				
Porotos	3.2	38:1	518	1650
Habas	4.0	29:1	608	1400
Hortalizas(hojas)				
Tomate	5.5	12:1	603	3300
Cebolla	7.0	15:1	514	3600

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

Tabla 8. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos

Materiales	%C	%N	C/N
Residuos Animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Residuos Vegetales			
Rastrojos maíz	40	0,75	53:1
Leguminosas	38	1,50	28:1
Hortalizas	30	1,80	17:1

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

1.10.2 Relación Carbono/ Nitrógeno de las materias primas. 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. Estas bacterias consumen 30 veces más Carbono que Nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1. A continuación, se presentan los valores promedios aproximados de la relación carbono /nitrógeno de algunos residuos que permitirán analizar con que materias primas se alcanzan las relaciones C/N más óptimas generando de esta manera mezclas que obtienen como producto una mejor calidad del biogás.⁵²

Tabla 9. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural

Materiales	%C	%N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Residuos Vegetales			
Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

La descomposición de materiales con alto contenido de Carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la ausencia de nitrógeno, pero el proceso de producción de biogás es más prolongado. Caso contrario para una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la

⁵²ROMAN, Pilar, MARTÍNEZ, María, PANTOJA, Alberto. Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. Santiago de Chile. 2013. 112 p

actividad microbiana por la exagerada cantidad de amonio, y al encontrarse en altas cantidades es muy tóxico e inhibe el proceso de generación de biogás.⁵³

1.10.3 Sólidos Totales (kg/m^3). De forma general el estiércol fresco contiene 17% de sólidos totales, estos sólidos representan el peso del estiércol seco, y por lo tanto es la carga real de materia sólida que alimenta al digestor.⁵⁴

Ecuación 1. Determinación de sólidos totales

$$ST = \frac{\text{carga diaria} * 0,17}{V_R}$$

Dónde: SV=Sólidos volátiles

V_R =Volumen del reactor

1.10.4 Sólidos Volátiles (kg/m^3). Los sólidos volátiles representan la parte de los sólidos totales de estiércol que pasa a fase gaseosa. De forma general equivalen al 77% de los sólidos totales.⁵⁵

Ecuación 2. Determinación de sólidos volátiles

$$SV = ST * 0,77$$

SV=Sólidos Volátiles

ST=Sólidos Totales

1.10.5 Temperatura. La temperatura es de gran importancia en el diseño de un biodigestor, teniendo en cuenta que este factor se involucra directamente con la velocidad de digestión anaeróbica. Una variación descontrolada en la temperatura, genera la desestabilización del proceso llevado a cabo. Por lo que se debe implementar un sistema de agitación adecuado y un control de temperatura constantemente, para garantizar una temperatura homogénea en el sistema. Existen tres rangos de temperatura en los que trabajan los microorganismos

⁵³ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011. 30 p.

⁵⁴ Cáceres, Edgar. Producción de Biogás: Construcción de un biodigestor. [en línea]. <http://www.mailxmail.com/curso-produccion-biogas-construccion-biodigestor/biogas-produccion-diaria>. Recuperado en 17 de noviembre de 2017.

⁵⁵ Cáceres, Edgar. Producción de Biogás: Construcción de un biodigestor. [en línea]. <http://www.mailxmail.com/curso-produccion-biogas-construccion-biodigestor/biogas-produccion-diaria>. Recuperado en 17 de noviembre de 2017.

anaeróbicos. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo.⁵⁶

Tabla 10. Rangos de Temperatura y Tiempo de Fermentación Anaeróbica

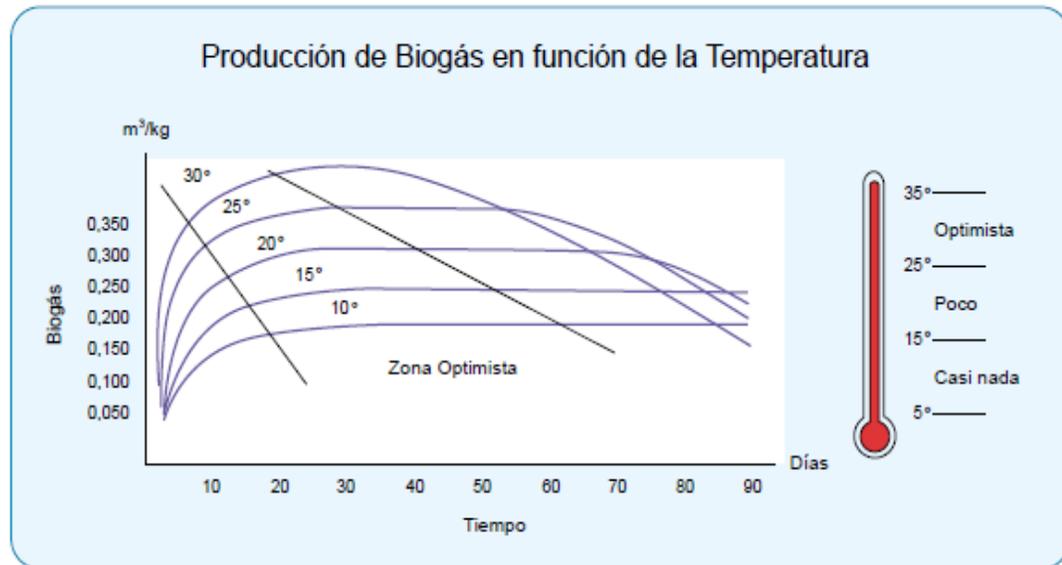
Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrofílica	4-10°C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20°C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metano génica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

El rango mesófilo es el más utilizado, aunque en la actualidad se está implementando el termófilo, con el fin de aumentar la velocidad del proceso, pero con algunas restricciones debido a que es inestable a los cambios en las condiciones de operación. Sin embargo, presenta menores problemas de estabilización que los otros rangos de temperatura.⁵⁷

Para el buen funcionamiento de un biodigestor, se debe diseñar para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0,6-1,2°C/día.⁵⁸

Grafica 2. Producción de biogás en función de la temperatura



Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

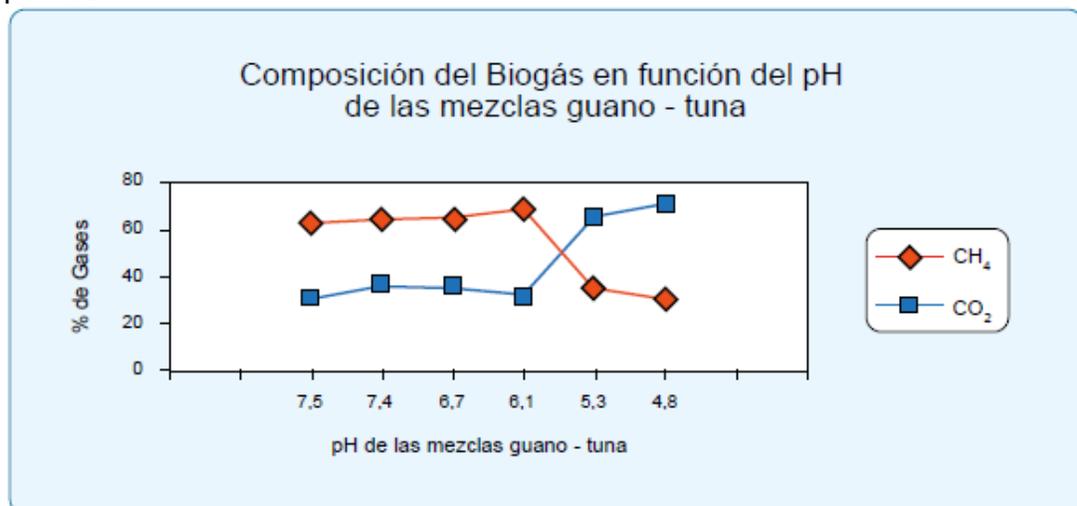
⁵⁶ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011. 39 p.

⁵⁷ DOMINGUEZ,Jaime, BARCELÓ,Óscar,MARTINEZ,Simón.Efecto de la temperatura sobre la fermentacion anaerobia de aguas residuales municipales.Instituto de Ingenieria.Mexico D.F.

⁵⁸ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011. 39 p.

1.10.6 Rangos de pH y alcalinidad en el proceso y en la biomasa. El proceso anaeróbico es afectado con pequeños cambios en los niveles de pH, cuando se encuentra fuera del rango adecuado. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a los cambios de pH, en comparación de otros microorganismos anaeróbicos. Los microorganismos pertenecientes a esta comunidad, presentan mejores niveles de actividad en valores cercanos a la neutralidad; los valores óptimos para microorganismos acidogénicos se encuentran en un rango entre 5.5 y 6.5, para metanogénicos entre 7.8 y 8.2, para el caso de cultivos mixtos el rango ideal debe estar entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el adecuado. Para que el proceso se lleve a cabo de la mejor manera, el pH no debe estar por debajo de 6.0, ni por encima de 8.0. El valor de pH en un biodigestor determina la producción de biogás, además de su composición.⁵⁹

Grafica 3. Composición de biogás en función de pH de la mezcla de materias primas



Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

Los valores bajos en el pH, causan una disminución en la actividad de los microorganismos metanogénicos, aumentando de esta manera la acumulación de ácido acético e Hidrogeno. Por otra parte, el pH afecta los equilibrios químicos que se presentan en el medio, llevando a la formación de componentes que influyen en el proceso⁶⁰. El pH de un sistema anaeróbico, que opera en los rangos ideales, es controlado principalmente por la alcalinidad del sistema. La destrucción de la materia orgánica, principalmente las proteínas que liberan amoníaco.

⁵⁹ OROBIO, Brayan. Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de bioresiduos de origen municipal. Revista U.D.C.A Actualidad y divulgación científica. 2014.

⁶⁰ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 43 p.

1.10.7 pH en la biomasa. El control del equilibrio ácido-base (valor de pH), es de los principales problemas que se presentan en el proceso, debido a presencia de acidez del medio en el que se realiza la producción de gas, se debe tener en cuenta el rango óptimo de pH para la operación, siendo éste de 6,6 a 7,6.

El pH es fundamental en la producción del biogás y la composición de metano, si se encuentra por debajo de 6,2 la acidez del biodigestor inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas, y si se encuentra en 4,5 se ve afectado los cultivos ácido génicos.⁶¹

⁶¹ [Anónimo]. DIGESTION ANAEROBIA [en línea].Recuperado en 12 de Noviembre de 2017]Disponible en: <https://goo.gl/69BUzj>

2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGAS

Para el diseño del biodigestor en el municipio de Jerusalén Cundinamarca fue de vital importancia un estudio enmarcado en el campo de investigación de energías alternativas. En este capítulo se presentan todos los aspectos relacionados con el funcionamiento y diagnóstico del sistema de biodigestión implementado en Jerusalén. Además, se realiza un análisis de fallas tanto a nivel operacional como de la materia que es alimentada al biodigestor junto con el análisis del contenido y presencia de metano en el biogás producido.

2.1 DATOS BÁSICOS DE JERUSALEN

A continuación, se describen los datos y parámetros necesarios y relevantes: lugar de instalación de la planta, mediciones estadísticas poblacionales del sitio e información esencial en el desarrollo del plan piloto para la construcción del biodigestor. Jerusalén es un municipio de Cundinamarca, ubicado en la provincia del Alto Magdalena, a 113 km de Bogotá, su área municipal es de 336km^2 ; limita al norte con los municipios de Puli y Quipile; al este con los municipios de Apulo, Anapoima y Tocaima; al sur con los municipios de Tocaima y Nariño y al oeste con los municipios de Guataqui y Beltran.⁶²

Tabla 11. Datos Físicos de Jerusalén

DATOS FÍSICOS DE JERUSALEN(CUNDINAMARCA)	
Descripción	Cantidad
Temperatura media	32°C
Temperatura máxima	34°C
Temperatura mínima	23°C
Clima	Cálido
Humedad relativa	84%
Población	2.679
Población CON gas natural (Porcentaje y número de personas)	9,14% 245
Población SIN gas natural (Porcentaje y número de personas)	90,85% 2.434

Fuente: MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. [en línea]: Disponible en https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23883779/300517_reporte_cobertura_2017-I_GAS_NATURAL_x_red.pdf/5e766197-b9c4-4479-89d1-a6e23dabcae4. Recuperado en 10 septiembre 2017

⁶²ALCALDIA DE JERUSALEN (CUNDINAMARCA). Sitio Oficial de Jerusalén. [En línea]. 2016-2019. [Citado el 3 de octubre de 2017. Disponible en internet: <http://www.jerusalencundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml>

Con el fin de disminuir tanto daños ambientales como a la población de Jerusalén, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) plantea una solución para producir biogás para hogares sin acceso a la red de gas natural, con el fin de que familias del municipio ubicado en Cundinamarca puedan sustituir la leña para la cocción por medio del biogás obtenido, además del aprovechamiento de los residuos generados por las cabezas de ganado presentes en la zona rural. Como respuesta a este problema se plantea este proyecto piloto que avanza en el municipio de Jerusalén para convertirlo en el primer municipio eco sostenible de Cundinamarca y de Colombia, denominado también proyecto XXI.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El biodigestor corresponde a un tanque cúbico (IBC) de $1m^3$ de capacidad y un tanque de almacenamiento artesanal para el gas obtenido, según las condiciones del lugar, es adecuado para temperaturas ambiente mayores a $25^{\circ}C$ (“existen tres rangos de temperatura en lo que pueden trabajar los microorganismos anaerobios psicrófilos por debajo de $25^{\circ}C$, mesófilos entre 25 y $45^{\circ}C$ ” y termófilos entre 45 y $65^{\circ}C$)⁶³; debido a que la temperatura es una variable importante en el proceso llevado a cabo para la obtención del biogás y teniendo en cuenta que dicha variable afecta significativamente el cultivo de fermentación de la biomasa. El aislamiento no es necesario debido a la temperatura del municipio, pues el cambio de ésta a lo largo del día no es significativo; como lo señala Alejandro Bautista ⁶⁴ el tiempo de retención es decir la duración de las bacterias para digerir el lodo y producir biogás dependerá de la temperatura de la región donde se encuentra instalado el biodigestor, procesos con temperatura entre $12-35^{\circ}C$ son los más adecuados, lo que hace a Jerusalén un buen lugar para llevar a cabo la producción de biogás. Por otro lado, el sistema de agitación se realiza de manera manual, sin controlar la intensidad y duración de ésta.

Aunque el tanque de operación fue diseñado e implementado por personal capacitado, además de observar grandes resultados en la puesta en marcha de este proyecto, se hace necesario analizar los parámetros y el funcionamiento del mismo, debido a que por tratarse de un proyecto piloto de estructura artesanal el sistema está sometido a fallas constantes y por tanto, es indispensable encontrar y lograr una mejora en el biogás producido en dicho biodigestor.

Las siguientes secciones muestran los parámetros de funcionamiento actuales en el sistema de biodigestión mencionado y las características más relevantes en la operación:

⁶³ MINISTERIO DE ENERGIA .Manual de Biogás: Factores determinantes en el proceso metanogénico. Santiago de Chile.2011. 119 p.

⁶⁴ BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos: Parámetros. Trabajo de grado para optar el título de ingeniería de materiales e ingeniería química. Nicaragua. Universidad Carlos III de Madrid escuela politécnica superior. Departamento de ciencia e ingeniería.2010.68 p.

2.2.1 Recolección de desechos animales. Este procedimiento de recolección de los residuos del ganado “vacuno”, se realiza de manera sencilla, teniendo en cuenta que es un proceso artesanal; simplemente los residuos dejados por el ganado en los corrales, es recogido con ayuda de escoba y recogedor, para posteriormente almacenarlo en recipientes de 5 galones, para su previa alimentación al biodigestor.

2.2.2 Alimentación. La alimentación al sistema se realiza a través de un tubo de PVC ubicado en la parte frontal del biodigestor, por donde ingresan los residuos recolectados y el agua. Este proceso no está regulado, es decir, la alimentación se da en cualquier hora del día y sin tener las proporciones adecuadas, además de no tener los controles requeridos para el almacenamiento de residuos animales.

2.2.3 Agitación. El proceso de agitación se lleva a cabo básicamente con un bordón tubular de diámetro de 6 cm, el cual está ubicado de manera transversal en el interior del tanque, pero debido a sus condiciones de deterioro, el sistema de agitación se está viendo afectado pues el movimiento a realizar no se puede llevar a cabo de manera satisfactoria. Por otro lado, las personas encargadas de dicho proceso no están bien capacitadas haciendo la agitación de manera incorrecta y más veces de lo indicado.

2.2.4 Extracción de lixiviados. Este procedimiento se realiza por la parte posterior del biodigestor, en donde se encuentra ubicado un tubo de PVC con las mismas características del tubo de alimentación; por este tubo se realiza la extracción de los lixiviados generados durante el proceso de fermentación, que son utilizados posteriormente como biofertilizantes de suelos.

2.2.5 Gas Obtenido. El gas obtenido es llevado a la casa, por medio de mangueras SWAN de ½ pulgada con abrazaderas que evitan escapes de gas, válvulas en forma de “Y” plásticas tipo globo que permiten el paso del gas generado hacia el tanque y válvulas de seguridad para el paso del biogás a la estufa instalada, para poder hacer uso del biogás obtenido en el proceso.

2.2.6 Sistema de drenaje. Como parte del proceso se cuenta además con un sistema de drenaje cuya función es evitar que las mangueras por donde pasa el biogás no se obstruyan por el paso de agua, este sistema consta de un envase de politereftalato de etileno de 3 litros lleno en su totalidad con agua. Este sistema implementado funciona como una válvula de drenaje, dándole salida al biogás del biodigestor en forma de vapor debido a su alta temperatura dentro del mismo, dicho vapor es condensado por las mangueras anteriormente mencionadas. Los efluentes generados durante el proceso de producción del biogás no son desperdiciados, y son utilizados como biofertilizantes y abonos para los suelos, árboles y plantas presentes en los alrededores de la planta de producción.

Figura 6.Descripción del proceso



Fuente: BURGHARDT, Freddy. Planta de biogás doméstico. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.Jersusalen.2017

2.3 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA ALIMENTADA AL BIODIGESTOR

2.3.1 Metodología FOS /TAC. Las muestras tomadas son de biomasa seca antes de introducirla al sistema, biomasa extraída del biodigestor la cual ya contiene agua. El muestreo se llevó a cabo en las instalaciones de la planta. Para la toma de la biomasa seca se utilizaron frascos de plástico comúnmente utilizados para pruebas de laboratorio, tomando aproximadamente 50 g de biomasa, previo al envase se tomó la temperatura de la muestra y se obtuvo un rango de 28°C a 30°C. En cuanto a la biomasa presente al interior del biodigestor fue necesaria una manguera de 1 metro tipo swan de ½ pulgada para realizar la agitación en el tubo de alimentación, y de esta manera obtener la muestra de biomasa húmeda, también se utilizaron bolsas herméticas para el almacenamiento de la sustancia extraída. Se logró extraer un aproximado de 1 litro, al cual se le realizaron pruebas de pH con un resultado entre 7.5 y 8, y de temperatura obteniendo un rango entre 28°C a 30°C.

Para realizar esta prueba se tomaron 5 muestras para determinar el parámetro FOS/TAC, cuyo objetivo es establecer la relación entre ácidos orgánicos volátiles (FOS) y carbonato orgánico total (TAC). Adicionalmente se lograron medidas de pH

que ofrecen información sobre el estado general del proceso, de esta manera pueden establecerse prevenciones ante un cambio de condiciones de alimentación.

En primer lugar, las muestras son conservadas a una temperatura \leq a 4°C para evitar la actividad microbiana antes de haber sido analizada. Para llevar a cabo este proceso se usan equipos facilitados por la CAR, estos equipos mencionados se encuentran en la tabla 12 con sus modelos correspondientes. Los reactivos usados para tal fin, son ácido sulfhídrico 0,1N, agua desionizada, y buffers de diferentes pH 4, 7 y 10 respectivamente, adicionalmente 1 filtro de 1 mm de diámetro, beacker de 250 m L y probeta de 25 m L como materiales para poder realizar la prueba.

Tabla 12.Equipos

Nº	CODIGO	NOMBRE
1	GAM-IS-26	Bureta digital Brand
2	GAM-IS-31	pH Metro Mettler Toledo (Seven Easy E20)
3	GAM-IS-04	pH Metro Fischer Scientific (Modelo 15)
4	N.A.	Placa de agitación

Fuente: Corporación Autónoma Regional. Determinación de la relación FOS/TAC para una planta de biogás por titulación acida.2017.

Para el análisis de la biomasa en el diagnóstico se tomaron 5 mediciones periódicas, cuyos resultados obtenidos son consignados en la tabla 13 y de los cuales se extrajo un valor promedio de 0.33 ,a partir del cual y teniendo en cuenta la sección 1.7.2 pudo determinarse que la relación FOS/TAC hace referencia a una carga baja en la cantidad alimentada al biodigestor, por tal motivo se sugiere entrar a un proceso de adecuación así como ajustar la cantidad de biomasa para que el proceso no tenga fallas y el biogás pueda producirse en las más óptimas condiciones además de que el biodigestor se encuentre estable frente a su funcionamiento evitando costos posteriores.

Tabla 13.Resultados FOS/TAC biodigestor en diagnóstico

Muestra	Relacion FOS/TAC
1	0,4042
2	0,4017
3	0,3748
4	0,2875
5	0,1791

2.3.2 Análisis de pH. Se realizó con un pH metro suministrado por el laboratorio. Los resultados recopilados para el biodigestor estudiado en el tiempo del diagnóstico se presentan a continuación:

Tabla 14. Resultado pH biodigestor en diagnóstico

Muestra	Biodigestor 1	pH
1	1	7,835
2	1	7,93
3	1	7,928
4	1	7,904
5	1	7,999

Los valores medidos en el líquido sobrenadante a lo largo del experimento oscilaron entre 7,8 y 7,9 dando un promedio de 7,92, para el estudio de mantenimiento ácido-base (valor de pH) para el biodigestor analizado, a partir de esto pudo determinarse que los valores de pH arrojados no están muy lejanos del intervalo proporcionado por la bibliografía (6,6 -7,6)⁶⁵ pero al no estar dentro de este intervalo se inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas y acidogénicas ocasionando una baja producción de biogás, así como una composición de metano deficiente.⁶⁶

Las condiciones a las que se llevó a cabo el muestreo, no cuentan con una metodología adecuada para la recolección de las muestras, dichas muestras fueron recolectadas en días diferentes, bajo una temperatura promedio cercana a los 30°C, siendo esto un factor importante que puede afectar los resultados obtenidos durante la prueba.

Grafica 4.p H en biodigestor de diagnóstico



⁶⁵ FRIEDRICH, Francisco. La energía de la biomasa: procesos de transformación de la biomasa en energía. [en línea] < https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm > [Citado en 10 de noviembre de 2017]

⁶⁶ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Factores determinantes en el proceso metanogénico. Santiago de Chile.2011. 38 p.

2.3.3 Análisis de temperatura. Durante las visitas al municipio de Jerusalén, se realizaron diferentes actividades, dentro de ellas la toma de temperatura en el sistema de operación del biodigestor, siendo éste un factor importante en el proceso de biodigestión, teniendo en cuenta que si la temperatura no es adecuada se puede presentar muerte microbiana, ocasionando la desestabilización de todo el proceso de producción del biogás. Este análisis se llevó a cabo con una termocupla, midiendo la temperatura directamente en la cámara de digestión, es allí donde se debe mantener la temperatura, para que el crecimiento de los microorganismos metanogénicos sea el mejor. Los resultados obtenidos se exponen a continuación:

Tabla 14. Medición de Temperatura

Medición	Temperatura Obtenida
1	30 °C
2	28 °C
3	29 °C
4	31 °C
Promedio	29,5°C

Luego de haber realizado la toma de temperatura en diferentes horas del día, se observa que no hay una variación significativa de la temperatura, y los resultados obtenidos se encuentran en los rangos establecidos para microorganismos metanogénicos “mesófilos” (25-45°C)⁶⁷, lo que indica que este factor no afecta la producción de biogás, operando en la temperatura óptima para microorganismos mesófilos (Tabla 15).

2.4. METODOLOGIA PARA EL CONTENIDO DE METANO EN EL BIOGÁS PRODUCIDO

Para el muestreo de gas se implementó un acople de manguera conectado a la válvula que distribuye el gas hacia los tanques de almacenamiento y a su vez dirigiéndose a una bolsa de suero vacía con una capacidad de 500 ml y se repitió la operación tomando un total de cuatro muestras. El gas saliente del sistema se encontraba a temperatura ambiente.

⁶⁷ MINISTERIO DE ENERGIA .Manual de Biogás: Factores determinantes en el proceso metanogénico. Santiago de Chile.2011. 38 p.

Figura 7. Muestreo del biogás

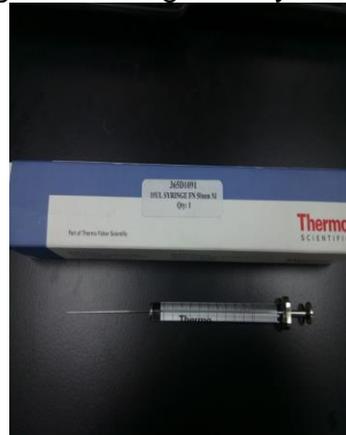


En primer lugar, se realizó una cromatografía de gases de tipo cualitativa con el fin de identificar la presencia de metano; ya que éste es el que aporta la inflamabilidad y a esto se debe su gran importancia, fue necesario tomar tres muestras en diferentes horas del día para la realización de la prueba. Para la prueba realizada se utilizó un cromatógrafo de referencia TSO QUANTUM XLS de marca Thermo scientific y una jeringa de inyección de volumen bajo para gases de 10 μ L de la misma marca.

Figura 9. Cromatógrafo TSO QUANTUM XLS



Figura 8. Jeringa de inyección



Luego de determinarse la presencia de metano en el gas mediante la cromatografía de tipo cualitativa, se procedió a tomar nuevamente muestras extraídas de la planta de Jerusalén, esta vez con el fin de identificar el porcentaje de metano que contiene el biogás, mediante una cromatografía líquida/gas de tipo cuantitativa. Esta prueba fue realizada en la Universidad Nacional de Colombia. El equipo utilizado para realizar este tipo de procedimientos se conoce como cromatógrafo de gases, que

consiste en diversos módulos ensamblados con el fin de proporcionar un flujo constante del gas que está siendo transportado conocido como la fase móvil.

En este método la muestra se volatiliza y es inyectada en la cabeza de una columna cromatografía, la extracción se produce por el flujo de una fase móvil de un gas inerte donde la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito.⁶⁸

Para el análisis del gas se cuenta con la siguiente información:

Tabla 15. Datos del ensayo

Equipos	
Equipo	Cromatógrafo Hp 5890
Detector	TCD. Temperatura 150 °C
Inyector	Temperatura 100°C
Columna	Malla molecular 13x
Tamaño de Muestra	0,1 ml

Mediante esta prueba se puede cuantificar únicamente porcentaje (% vol) de Hidrógeno y de metano, debido a las características de la columna a utilizar y de los patrones requeridos para la realización del análisis. Para la ejecución de la prueba fue necesario llevar tres bolsas de suero de 500 ml con el gas contenido y selladas en su totalidad, para garantizar que el gas no se contamine con agentes externos. Dichas muestras fueron tomadas en tres días diferentes, para de esta manera obtener un resultado para cada muestra y observar la repetitividad que se presenta. Finalmente, los resultados son expresados en %vol de Hidrógeno y metano. Como se presentan a continuación:

Tabla 16. Resultados

MUESTRA	%Vol. Metano			
	1	2	3	PROMEDIO
	45	50,2	41,2	45,5
MUESTRA	%Vol. Hidrogeno			
	1	2	3	PROMEDIO
	n.d	n.d	n.d	n.d
n.d no detectado, por debajo del límite de detección (<0,5% v/v)				

Fuente: Universidad Nacional de Colombia, Laboratorio de ingeniería química.

⁶⁸ PEREZ, Laura Patricia. MAGADA, Héctor. Métodos de biotecnología: Cromatografía de gases. [En Línea].2004. [Citado en 3 de Octubre de 2017]. Disponible en internet: http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/cromatografia_de_gases.pdf

2.4.1 Análisis del contenido de metano. Para el caso de la prueba cualitativa se procedió a inyección de 5 µL de la muestra referencia “BLANCO” y luego la muestra de biogás recolectada ingresa por el inyector y posteriormente a la fuente de iones arrojando como resultado un espectro de masa de “tiempo en función de señal”, determinando de esta manera la intensidad relativa de los picos de los componentes detectados en el análisis realizado por el cromatógrafo. Para esta muestra se realiza la comparación del espectro de masa del blanco o referencia con el espectro de la muestra de biogás.

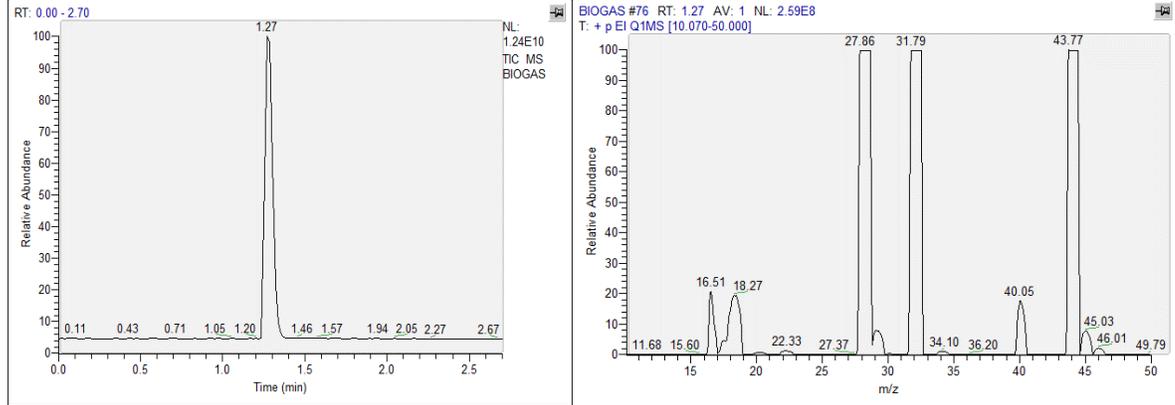
Adicionalmente se presenta el espectro de masa resultado, de un duplicado, llevada a cabo con las mismas características de la prueba anterior.

Las condiciones bajo las que se llevó a cabo la toma de las muestras del gas no son las pertinentes, teniendo en cuenta que se utilizaron bolsas de suero, las cuales no cuentan con las mismas características que una bolsa Tel Pac utilizadas normalmente para la recolección de muestras en estado gaseoso. Por otro lado, no se cuenta con un protocolo adecuado para realizar el muestreo debido a las condiciones de ubicación del biodigestor.

Tabla 17. Componentes presentes en espectro de masa

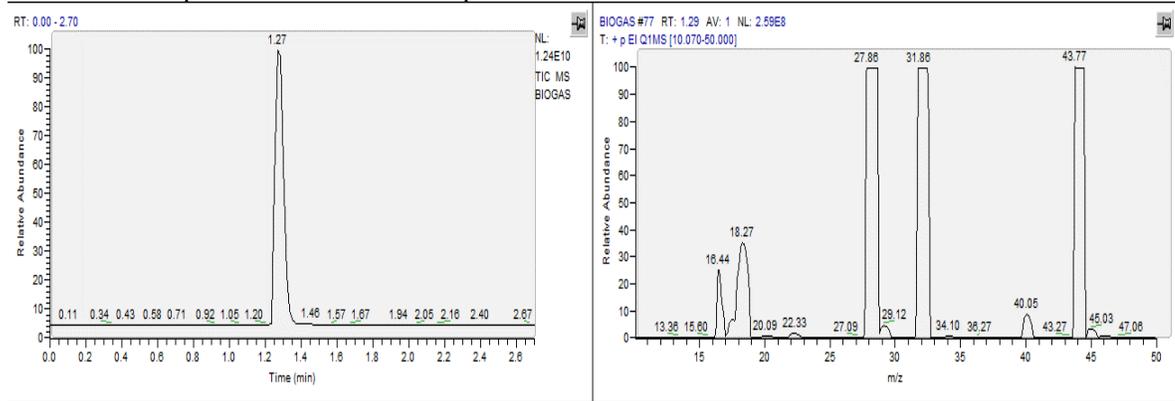
Componente	Peso molecular g/mol
Metano	16,51
Agua	18,27
Nitrógeno	27,86
Oxígeno	31,79
Ácido sulfhídrico	34,1
Argón	40,05
Dióxido de carbono	43,77
Isotopos del carbono	45,03 – 46,01

Grafica 5. Espectro de masas muestra 1



Fuente: Corporacion Autonoma Regional de Cundinamarca, laboratorio CAR.

Gráfica 6. Espectro de masas duplicado



Fuente: Corporacion Autonoma Regional de Cundinamarca, laboratorio CAR.

Realizando el análisis del espectro correspondiente a la muestra 1 se determina la presencia de ocho componentes de gran aporte a la composición del biogás. Determinando que el Nitrógeno, Oxígeno y dióxido de Carbono se encuentran en estado de saturación, el espectro de estos componentes no termina en pico sino en línea horizontal. Se determina de manera satisfactoria la presencia de metano el cual es el compuesto de interés, pues éste es quien aporta la inflamabilidad del biogás y dependiendo de su concentración se determina la flamabilidad del producto final.

Por otra parte se detecta el ácido sulfhídrico quien aporta el olor característico a huevo en descomposición, al biogás; adicionalmente, agua, argón, y algunos isótopos del Carbono. La presencia de Nitrógeno y Oxígeno se debe a la falla en el sistema de hermetizado implementado en el tanque lo que permite el ingreso de aire y por ello se presenta contaminación por parte del Nitrógeno y Oxígeno en el gas obtenido (según el manual de biogás solo de haber un 12 % de Nitrógeno

aproximadamente 12 g por cada 100 g de biomasa producida⁶⁹). Teniendo en cuenta que es un proceso anaerobio, la presencia de Oxígeno no es pertinente, debido a que afecta a los cultivos microbianos. Por otra parte el exceso de Nitrógeno puede llegar a inhibir la digestión.⁷⁰

Para el caso del duplicado se determinó nuevamente la presencia de los gases resultantes en la prueba número uno y con condiciones similares en cuanto a saturación y contaminación por parte de Nitrógeno y Oxígeno.⁷¹

A partir de los resultados obtenidos de la cromatografía cuantitativa, se evidencia que únicamente en la muestra número 2, el porcentaje de metano en el biogás supera el 45%, logrando determinar que esta variación en los resultados depende estrechamente a como se mencionó antes la falta de control estricto y riguroso en los parámetros de operación y en la alimentación al biodigestor. En las otras muestras se encuentra igual o por debajo del porcentaje adecuado que debe contener un biogás. Por otra parte, analizando el porcentaje obtenido en el promedio, supera de manera muy pequeña el 45%, por lo que se puede deducir que el metano producido bajo las condiciones actuales de operación presenta serios problemas de inflamabilidad, teniendo en cuenta para que éste sea inflamable debe superar al menos el 2% el porcentaje base de contenido de metano es decir 45%.⁷²

Además se observan los resultados para Hidrógeno, donde no se evidencia la presencia de este compuesto por debajo del límite de detección (<0,5% v/v) en el biogás lo que resulta ser satisfactorio, de acuerdo a que el biogás es una mezcla principalmente de metano y dióxido de Carbono.

2.5 PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS

- Cantidad de estiércol generada. Durante la recolección del estiércol por parte de la familia encargada, se observó que no tienen una metodología constante, en cuanto a lo que se recoge y posteriormente se alimenta, además hay días en los que no se lleva a cabo el proceso de alimentación. Por lo tanto, se realizó un estimado de la cantidad de estiércol alimentado, cuyo resultado fue de $35 \frac{kg}{dia}$.

⁶⁹ MINISTERIO DE ENERGIA .Manual de Biogás: Factores determinantes en el proceso metanogenico. Santiago de Chile.2011. 119 p.

⁷⁰ MINISTERIO DE ENERGIA .Manual de Biogás: Factores determinantes en el proceso metanogenico. Santiago de Chile.2011. 119 p.

⁷¹ MINISTERIO DE ENERGIA .Manual de Biogás: Factores determinantes en el proceso metanogenico. Santiago de Chile.2011. 119 p.

⁷² MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Procesos de biodigestión. Santiago de Chile.2011. 16 p.

- Carga de alimentación. Inicialmente se debe calcular la cantidad de agua a añadir, para la dilución de la mezcla, teniendo como referencia una relación 1:3, es decir la cantidad de materia a alimentar por el número que representa dicha relación para el agua, tomando esta relación se obtiene $35 \times 3 = 105$ L, obteniendo una carga de alimentación.

Ecuación 3.Carga de alimentación

$$carga \frac{m^3}{dia} = 35 + 105 = 140 \frac{L}{dia} = 0.14 \frac{m^3}{dia}$$

La expresión para calcular el estimado del volumen de biogás producido, tiene en cuenta la cantidad de sólidos volátiles en la mezcla y un factor de producción de biogás por kg de sólidos volátiles.⁷³

$$ST = \frac{carga\ diaria * 0,17}{V_R} \quad (1)$$

$$ST = \frac{35 \frac{kg}{dia} * 0,17}{1m^3} = 6 \frac{kg}{m^3}$$

Donde:

SV=Sólidos volátiles

V_R =Volumen del reactor

$$SV = ST * 0,77 \quad (2)$$

Donde:

SV= Sólidos Volátiles

ST=Sólidos Totales

$$SV = 6 \frac{kg}{m^3} * 0,77$$

$$SV = 4.6 \frac{kg}{m^3}$$

El valor obtenido para sólidos volátiles, es bueno, debido a que la tasa de carga de SV para una biodigestión mesofílica es de $1,6 \frac{kg}{m^3}$ y $4,8 \frac{kg}{m^3}$ ⁷⁴

⁷³ Cáceres, Edgar. Producción de Biogás: Construcción de un biodigestor. [en línea]. <http://www.mailxmail.com/curso-produccion-biogas-construccion-biodigestor/biogas-produccion-diaria>. Recuperado en 17 de noviembre de 2017.

⁷⁴ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011. 85 h.

2.5.1 Cálculo de la producción de Biogás. Depende de la cantidad de sólidos volátiles que haya en la carga de estiércol diaria. Se considera que 1 kg de sólidos volátiles produce $0,27m^3$ de biogás.⁷⁵

Ecuación 4. Producción de Biogás

$$PB = 0,27 * SV * V_m$$

PB=Producción de Biogás

SV=Sólidos Volátiles

V_m = Volumen de carga

$$PB = 0,27 \frac{m^3}{kg} * 6 \frac{kg}{m^3} * 0.14 \quad (4)$$

$$PB = 0.23 \frac{m^3}{dia} * 20 = 4.6 \frac{m^3}{mes}$$

Observando los resultados obtenidos mediante la ecuación se obtiene que se produce $0.23 \frac{m^3}{dia}$ de gas con una equivalencia mensual de $4.6 \frac{m^3}{mes}$, observando que la familia no maneja un control de la carga al biodigestor; no es posible considerar 30 días al mes, sino por el contrario alrededor de 20 días en los cuales se realiza la operación de alimentación. Además el consumo anual de un hogar, se establece en la tabla 33. Con una relación diaria de alrededor $0,24 \frac{m^3}{dia}$, con que puede concluirse que la implementación del biodigestor es adecuada y beneficiosa, pero resulta necesario un aumento en la producción para no presentar faltas en el suministro del biogás.

2.6. INCONSISTENCIAS

Al realizar el análisis de la planta ubicada en el municipio de Jerusalén (Cundinamarca), se encontraron diversos factores que alteran el proceso de producción del biogás:

2.6.1 Carga. Este biodigestor opera hasta el momento únicamente con estiércol de ganado vacuno o porcino, no se hace uso de alguna clase de desechos vegetales ni desperdicios, se observó además, que las proporciones de estiércol y agua no están siendo las adecuadas pues la alimentación se realiza diariamente con la cantidad de excretas animales que son recogidos sin tener una proporción estimada y sin tener en cuenta algún parámetro establecido, la cantidad de agua se mide solo

⁷⁵ Caceres, Edgar. Producción de Biogás: Construcción de un biodigestor. [en línea]. <http://www.mailxmail.com/curso-produccion-biogas-construccion-biodigestor/biogas-produccion-diaria>. Recuperado en 17 de noviembre de 2017.

teniendo en cuenta que al realizar la mezcla ésta no se encuentre ni muy diluída ni muy seca, lo anterior permite observar exceso de espuma y costras que se crean dentro del biodigestor causando grandes complicaciones, pues llevan a la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducen el volumen efectivo del biodigestor, además de dificultar la salida del gas⁷⁶.

Al no usar cantidades de carga proporcionales, la biomasa se encontró muy líquida, disminuyendo considerablemente la presión en el interior del tanque. El pH el cual se encuentra en 7,92 teniendo en cuenta que el pH óptimo debe estar en un rango entre “entre 6,6 y 7,6 siendo el pH neutro ideal” para obtener un proceso adecuado. En la siguiente figura, se observa el estado que presentaba la carga que iba a ser depositada en el biodigestor además del aspecto, funcionamiento y uso artesanal que éste tenía.

Figura 10. Procedimiento de mezclado para obtener la carga



2.6.2 Válvulas y conexiones. Se encontraron fallas, que corresponden a la pérdida de gas en las válvulas que conectan a las mangueras, encargadas de transportar y distribuir el biogás al tanque de almacenamiento y a la cocina. Es importante corregir estos fallos, para disminuir al máximo las pérdidas de gas y de esta manera no reducir los niveles producidos.

2.6.3 Fugas del biodigestor. Las fugas analizadas del sistema, se encuentran principalmente en el tubo de alimentación, el tubo de drenaje de lixiviados y el sistema de agitación, debido a que el tanque utilizado para el almacenamiento es

⁷⁶ MINISTERIO DE ENERGIA .Manual de Biogás: Factores determinantes en el proceso metanogenico. Santiago de Chile.2011. 119 p.

de un material blando “plástico” tuvo que ser perforado para la adaptación de dichos montajes, con el paso del tiempo y los movimientos realizados a la hora de alimentar, extraer y agitar, da lugar a la salida de biomasa, lo que causa pérdidas y variación incontrolada de los parámetros de operación, relacionados con la efectividad del proceso. A continuación, se presentan las conexiones que se encontraron instaladas en el sistema de drenaje.

Figura 11. Conexiones, tuberías y sistema de drenaje



2.6.4 Sistema de Agitación. Realizado de manera muy artesanal con 2 palos redondos de madera asegurados con cuerdas de fique de manera que formen un ángulo recto con el fin de poder sujetarlo de manera correcta y así realizar la agitación. Se encontró que dicho sistema estaba muy deteriorado y a punto de quedar en desuso, lo que no contribuye de manera eficiente en el proceso, sabiendo que al estar en estas condiciones no se puede realizar la agitación pertinente.

Figura 12. Tubo de agitación



Para resumir este capítulo se presenta una tabla (N° 19), continuación con el fin de demostrar los datos obtenidos mediante el diagnóstico realizado, y hacer una comparación con datos bibliográficos.

Tabla 18. Resultados obtenidos en el diagnóstico

Resumen	Obtenido	Según Bibliografía
Relación FOS/TAC promedio	0.33	0.4 – 0.6 ⁷⁷
pH promedio	7.92	6.6 – 7.6 ⁷⁸
Temperatura	29.5	25 – 45 ° C ⁷⁹
Contenido de metano	45.5 % Vol.	> 45% Vol. ⁸⁰

Analizando los resultados obtenidos, se observa que los valores no están en los rangos adecuados, en comparación a los obtenidos mediante bibliografía.

⁷⁷ LESSIE, Ulrich, PUTZ, Pietra. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Planta de biogás de Wambeln.

⁷⁸ FRIEDRICH, Francisco. La energía de la biomasa: procesos de transformación de la biomasa en energía. [en línea] < https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm > [Citado en 10 de noviembre de 2017]

⁷⁹ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 38 p.

⁸⁰ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 38p.

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

3.1 PLANTEAMIENTO DE POSIBLES ALTERNATIVAS

A partir de las inconsistencias encontradas en el sistema de biodigestión en la planta de Jerusalén (Cundinamarca) se identifican posibles alternativas que pueden ser implementadas con el fin de mejorar el proceso de producción de biogás.

3.1.1 Selección de Materias Primas. En general cualquier sustrato puede ser utilizado como materia prima para obtener biomasa siempre y cuando contenga carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa, pero no son solo importantes estas fuentes de Carbono y Nitrógeno sino además es relevante un contenido de sales minerales, que para el caso de estiércol están presentes en proporciones adecuadas. De acuerdo a lo anterior es necesario que la recolección de desechos sea siempre teniendo en cuenta los componentes orgánicos que éstos presenten. El valor nutricional de la sustancia orgánica se relaciona directamente con el potencial de formación de biogás, por ende se busca que sea lo más alto posible⁸¹, condición que se cumple según los parámetros establecidos para las sustancias orgánicas aunque existen otros residuos de tipo vegetal que también serían eficaces a la hora de producir biogás en óptimas condiciones, pues como se observa en la gráfica 1,a mezcla proveniente de hojas y otros residuos vegetales está por encima de la producción de residuos animales. Según un estudio realizado por Rivas, Faith y Guillen⁸² donde realizaron una comparación con un biodigestor cargado con sustratos por separado y la mezcla de excretas con desechos orgánicos, se encontró un mejor rendimiento en la mezcla de sustratos que en la carga del biodigestor con sustratos por separado; caso que no ocurre para el biodigestor ubicado en Jerusalén cuya carga únicamente es realizada con estiércol de ganado.

3.1.2 Carga. Según Arboleda y Salcedo ⁸³ cuando la mezcla se encuentra demasiado diluída, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la

⁸¹ MEDEL, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Componentes presentes en el biogás y sus efectos. Memoria para optar el título de ingeniero civil mecánico. Santiago de Chile. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. 2010. 83 p.

⁸² RIVAS, Olga. VARGAS, Margie. GUILLEN, Rossy. Biodigestores: Factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnología en marcha. Vol 23. N° 1, Enero-Marzo 2010. 8 p.

⁸³ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009, 32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración.

producción del biogás es limitada. El uso primordialmente de estiércol, y desechos de agricultura como alimento para el digestor deberá tener una relación de biomasa a agua entre 1:1 y 1:2; lo que quiere decir que por cada 100 Kg de estiércol, se requerirán entre 100 y 200 litros de agua. Cuando el material de alimento consta principalmente de residuos vegetales, se requiere más agua en una razón de 1:3 o 1:4. Es importante también analizar las relaciones C/N óptimas a partir de ciertas mezclas que ayudarán a obtener el objetivo deseado. Como se observa en la tabla (N° 9) de relaciones C/N para algunos residuos, la relación para excretas vacunas es inferior a 25:1, lo que quiere decir que son ricas en Nitrógeno. En este aspecto entonces es necesario revisar tanto el contenido de agua como la carga de desechos agregados al biodigestor, observando que el funcionamiento del biodigestor al momento de hacer la mezcla de la cantidad de agua y desechos agregados, no era la apropiada y por lo tanto la biomasa se encontraba muy líquida y su estado no era el más apropiado.

3.1.3 Agitación. Se considera como alternativa de mejora una reparación en dicho sistema, observando que se ha ido deteriorando y se encuentra en un estado muy obsoleto; esto con el fin de que no se presenten constantemente pérdidas de biomasa, y de evitar la formación de costras, además de que no se permite la mezcla adecuada entre el sustrato fresco y la población microbiana.

3.1.4 Sellado del Biodigestor. Después de haber realizado el previo diagnóstico al biodigestor, se encontraron diversas fallas siendo una de ellas las fugas que permiten el ingreso de agentes contaminantes como lo es el aire, haciendo que el proceso ya no se realice en estado anaerobio. Por lo anterior se proponen ciertas alternativas como pueden ser sellado en el tubo de alimentación, uso de residuos neumáticos en las conexiones y por último sellado en el tubo de efluentes, esto con el fin de disminuir a la mínima cantidad el porcentaje de Oxígeno dentro del biodigestor, sabiendo que el ambiente debe estar totalmente anaerobio, debido a que las bacterias metanogénicas son muy sensibles al Oxígeno, y además previniendo las pérdidas de biomasa por las diferentes cavidades que alimentan y evacuan el biodigestor. Además de estas alternativas planteadas cuyo objetivo busca mejorar el proceso de producción de biogás, hay otros parámetros que para contemplar su efecto y ser contempladas dentro de alternativas de mejora requieren el cambio en aspectos que por delimitación de nuestro proyecto y sugerencia de la familia que opera el biodigestor no fueron tenidos en cuenta, sin embargo, son relevantes en el proceso de biodigestión.

- Volumen de materia orgánica. Al igual que el caudal de entrada si se deseara llevar a cabo una mejora frente a este parámetro se necesitaría modificar el volumen del reactor, lo que desde un primer momento se estableció no se

realizaría. Para asegurar que la mezcla degrade la materia orgánica, se debe considerar una relación 1: 1 o 1:2⁸⁴

- Filtrado del biogás. Para la reducción o eliminación total de H_2S se utilizan biofiltros, cloruro de Hierro, filtros de lana de Hierro, lavado con sosa, precipitación con SO_2 , filtros de astillas de madera con cloruro u óxido de Hierro, entre otros. El ácido sulfhídrico debe eliminarse con el fin de llevar la energía del biogás a otras necesidades de producción y servicios, además de que éste gas es muy tóxico y corrosivo para la salud humana. Este parámetro puede tenerse en cuenta al momento de identificar nuevas mejoras de alternativa, pero no es asequible para la población que tendrá el biodigestor a su disposición.

Contando además con que las alternativas planteadas de nuestra parte son netamente manuales, es decir, que pueden ser manipulables dentro del biodigestor, se encontraron otras que propiciarán una mejor calidad en la producción de biogás, pero al no ser asequibles por aspectos en general no fueron implementados ni tenidas en cuenta para el objetivo a realizar. Éstas se mencionan a continuación.

Tabla 19. Alternativas no implementadas

Agitación Mecánica	Recirculación	Adición del Microorganismo al Sustrato
<p>-Requiere supervisión constante.</p> <p>-Requiere de mantenimiento mecánico, manual o eléctrico.</p> <p>-Todo esto genera costos adicionales sobre este sistema que la población no puede costear además que genera una devaluación en la producción del biogás.</p>	<p>-Requiere de una bomba peristáltica, incrementado el costo de implementación del sistema.</p>	<p>-Requiere estudio del microorganismo para verificar su estabilidad dentro del sistema.⁸⁵</p>

⁸⁴ ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Palmira, 2009,32p. Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. Universidad Nacional Sede Palmira .Facultad de ingeniería y administración.

⁸⁵ BERNAL, Daniela, QUINTERO, Daniela. Desarrollo de una propuesta de mejora para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el Recodo .Fundación Universidad de America.Facultad de Ingenierías.2016.111p.

3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para poder seleccionar la mejor alternativa de mejora en la calidad del biogás producido, se utilizó el método de análisis multicriterio⁸⁶. En primer lugar, se enlistan las posibles alternativas de acuerdo con los factores que se observaron están afectando la calidad del biogás producido.

Tabla 20. Presentación de Alternativas

Alternativa	Descripción
A	Uso y recolección de otro tipo de desechos teniendo en cuenta la relación C/N que aumentan la producción de biogás.
B	Replantear la relación de carga (agua y desechos) al biodigestor y reconstrucción del sistema de agitación.
C	Reconstrucción en el sistema de agitación y hermetizado del equipo, sellado en tanque, tubos y mangueras.
D	Recolección y alimentación de desechos orgánicos seleccionados tomando como referencia su relación C/N, con la relación adecuada de materia prima y agua, realizando una agitación constante con el equipo en excelentes condiciones, además para que proceso se lleve a cabo en un medio anaerobio hermetizar conexiones, tuberías, tanque y mangueras.

1. Costo de cada alternativa.
2. Disponibilidad de recursos.
3. Rendimiento.
4. Capacitación previa.

A continuación, se califican las alternativas que se evaluaron de manera cualitativa, de acuerdo con los criterios seleccionados, y asignando una escala de valor dependiendo la importancia frente al objetivo planteado.

⁸⁶ JARABOF E, GARCIA F Método de los factores ponderados. Recuperado en 28 de Noviembre de 2017

Tabla 21. Escala cualitativa

Valor Asignado	Escala Cualitativa		
	(Disponibilidad de Recursos	Rendimiento	Capacitación)
1		Muy bajo	
2		Bajo	
3		Medio	
4		Alto	
5		Muy alto	

Para escoger la alternativa que sea viable económicamente y a la vez mejore la producción de biogás, se realizó una evaluación cuantitativa teniendo como referencia un rango de valores, como se puede ver a continuación:

Tabla 22. Escala Cuantitativa

Valor Asignado	Escala Cuantitativa	
	Costos	Rango
1	Muy alto	\$140.000 - \$175.000
2	Alto	\$ 61.000 - \$139.000
3	Medio	\$31.000 - \$ 60.000
4	Bajo	\$26.000 - \$30.000
5	Muy bajo	\$10.000 - \$25.000

Al hacer un estudio de los costos que conllevaban implementar cada una de las alternativas, los rangos se obtuvieron de analizar las alternativas y sus respectivos costos; teniendo en cuenta si este era muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo como se observa en la tabla 23. Finalmente, con los rangos ya definidos se procede a realizar el análisis multicriterio para la selección de la mejor alternativa según lo establecido anteriormente:

Tabla 23.Resultados análisis multicriterio

Criterios	Peso Relativo (%)	A	B	C	D
Costos	25	4	2	3	1
Disponibilidad de recursos	23	5	4	4	5
Rendimiento	40	1	3	2	5
Capacitación previa	12	1	3	1	5
Puntuación Total		2,8	3	3	4

Luego de realizarse el análisis multicriterio, se determina que la alternativa D “Recolección y alimentación de desechos orgánicos seleccionados tomando como referencia su relación C/N, con la relación de carga adecuada de materia prima y agua, realizando una agitación constante con el equipo en excelentes condiciones, además para que dicho proceso se lleve a cabo en un medio anaerobio hermetizar conexiones, tuberías, tanque y mangueras.”, es la más adecuada y la que se seleccionará pues como se observa en la tabla 24 es la alternativa más viable de solución al problema planteado, abarcando toda la problemática que presenta el biodigestor en análisis.

4. EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Después de la selección de la alternativa, se realiza su implementación que contempla mejoras al proceso actual como aumentar la cantidad de metano presente en el gas, teniendo en cuenta que en el diagnóstico se determinó que el gas generado no cumple con los parámetros establecidos.

La alternativa seleccionada mediante el análisis multicriterio no implica cambios en el diseño del biodigestor solo se realizan adecuaciones para mejorar las condiciones de operación del sistema y obtener como resultado un aumento en la cantidad de gas producido y en su concentración de metano. Dicho biodigestor opera de manera intermitente en estado estacionario, teniendo en cuenta que éste depende de la disponibilidad de los desechos para realizar la alimentación.

4.1 METODOLOGÍA REALIZADA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Después de seleccionar la alternativa de mejora, y haber determinado que se van a implementar las mejoras en base a la alternativa D, se presentarán a continuación las mejoras realizadas para finalmente analizar los resultados obtenidos en cuanto a la relación FOS/TAC y contenido de metano, tanto al biogás como a la biomasa después de la implementación de dichas mejoras.

- Alternativa D:
 - Recolección de desechos orgánicos: como medida general se propone alimentar el biodigestor con diferentes tipos de materia orgánica, que se encuentran disponibles en el hogar “estiércol de ganado vacuno, porcino, además residuos de cocina y agricultura”, esto con el fin de aumentar la producción de biogás teniendo en cuenta la relación C/N para cada uno de los desechos.
 - Carga: para esto se implementa la relación seleccionada 1:2, lo que significa que por porción de materia orgánica se debe adicionar el doble de agua, para este caso en específico son 100 kg de M.O y 200 kg de agua, obteniendo como resultado una consistencia adecuada en la carga a alimentar. En los casos en donde no se cuente con los 100 kg lo importante debe ser respetar la relación 1:2.
 - Agitación: Para ello se reemplazó el sistema de agitación con el fin de poder realizar dicho procedimiento de manera adecuada, para ello se implementó un tubo de PVC de manera transversal con dos aspas en el interior, para obtener un mezclado uniforme y homogéneo. Por la parte externa del tubo se adaptó un tornillo

con tuerca formando una T con el tubo del interior facilitando el proceso de mezclado. Ver figura 13.

○

Figura 13. Tubo de agitación con mejora



- Sellado: Como primera medida se propone sellar el conducto o tubo de alimentación, el cual presenta fugas a la altura de la conexión con el tanque permitiendo la salida de la biomasa, lo cual causa una descompensación de la carga adecuada que se le debe proporcionar al sistema.

Como segunda medida se propone la utilización de materiales reciclados para mejorar dichas condiciones, se utilizaron residuos de neumáticos en la conexión al tanque, de manera que presente mayor ajuste del tubo en la cavidad realizada en el tanque para dicha adaptación, también se proporcionó silicona líquida en el contorno con el fin de sellar orificios que no son detectados de manera visual. Se adaptó una tapa en la punta del tubo de alimentación hecha con residuos de botella y neumático para de esta manera disminuir el ingreso de aire por esta cavidad, para que sea removida solo y únicamente cuando se alimente el biodigestor. El mismo procedimiento se realizó en el tubo de lixiviados debido a que por éste se presentan fugas de biomasa ya fermentada, disminuyendo la cantidad de biomasa y permitiendo la entrada de contaminantes.

Como medida general se realizan empaques para disminuir el riesgo de pérdida del biogás generado, esto se realiza con teflón debido a que éste material no

reacciona significativamente con el gas, esto se realizó en las conexiones de las mangueras que transportan el biogás con las válvulas de paso y el tanque de diferencia de presión. Además, se realiza un proceso donde se hermetiza la manguera saliente del tanque de diferencia de presión hacia la cocinilla con silicona fría y teflón para no tener escapes de gas al ambiente y del agua almacenada en dicho tanque. Ver figura 14.

Figura 14. Implementación de empaques



4.2. PRUEBAS REALIZADAS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE METANO Y RELACIÓN FOS/TAC

La metodología llevada a cabo para realizar estas pruebas fue hecha bajo los mismos criterios expuestos en el capítulo del diagnóstico sección 2.3.

4.2.1 Análisis relación FOS/TAC

Tabla 24. Resultados FOS/TAC biodigestor antes y después de las mejoras

Muestra	Relación FOS/TAC	
	Diagnostico	Mejora
1	0,4042	0,2652
2	0,4017	0,4597
3	0,3748	0,3204
4	0,2825	0,6812
5	0,1792	0,5472
Promedio	0,32	0,45

Para las muestras analizadas después de realizar el diagnóstico, se calculó de la misma manera un valor promedio a partir de los resultados obtenidos para poder evaluarlo a partir del estudio realizado por Ulrich Lisie y Petra Putz ⁸⁷ quienes recomiendan un valor entre 0,4-0,6; este promedio para el caso de la implementación de mejoras fue de 0,45 a partir de lo cual se puede concluir que las mejoras implementadas tanto en la carga como en los aspectos relacionados con las carga a alimentar fueron significativas, sin embargo se recomienda que las mejoras realizadas deben seguir en constante control y mantenimiento para que el sistema no se vea posteriormente alterado.

La variación encontrada en los resultados obtenidos cuando no se implementó la mejora de alternativa a cuando se implementó , con relación al FOS/TAC puede atribuirse a la manera como se replanteó la recolección de desechos , la carga y el cuidado exigente por parte de la familia al momento de operar y alimentar el biodigestor, además aunque son mejoras muy artesanales y hechas manualmente son significativas pues a partir de los diferentes análisis realizados , los resultados obtenidos son positivos.

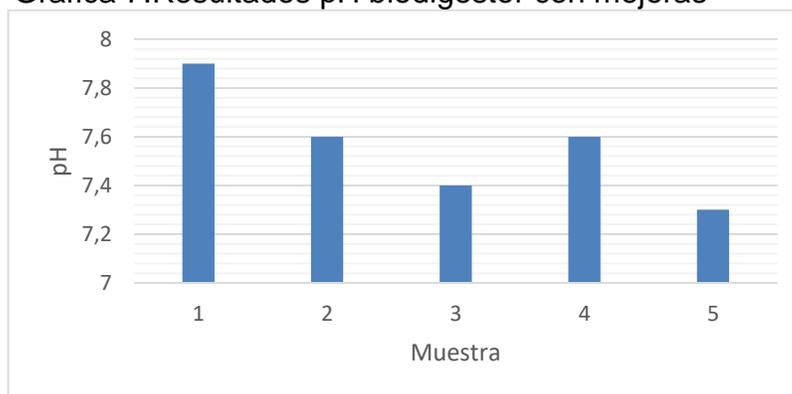
4.2.2 Análisis de pH. Para las muestras realizadas después del diagnóstico y posterior al implementar la mejora seleccionada, los resultados medidos por el pH metro fueron consignados a continuación, el procedimiento realizado para el estudio y posterior resultado, se hace en las mismas condiciones que en capítulo de diagnóstico. Por otra parte, se deben tener en cuenta las condiciones en las que se llevó a cabo el muestreo, debido a las condiciones no se cuenta una metodología adecuada para la recolección de las muestras, dichas muestras fueron recolectadas en días diferentes, bajo una temperatura promedio cercana a los 30°C, lo que puede presentar variaciones en los resultados obtenidos en la prueba realizada.

Tabla 25.Resultados pH biodigestor con mejoras

Muestra	Biodigestor 2	pH
1	2	7,9
2	2	7,6
3	2	7,4
4	2	7,6
5	2	7,3

⁸⁷ LESSIE, Ulrich, PUTZ, Pietra.Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Planta de biogás de Wambeln.

Gráfica 7. Resultados pH biodigestor con mejoras



Los resultados arrojados esta vez oscilaron entre 7,3 y 7,9 dando un promedio de 7,5 para este caso, que al ser comparado con el obtenido en el diagnóstico que fue de 7,92, evidencia el cambio de manera positiva, considerando así que las mejoras en cuanto a la agitación y el tipo de desechos alimentados pudo ser un factor importante para que el pH estuviera un poco más cerca al rango óptimo 6,6 a 7,6⁸⁸. Teniendo en cuenta además y como se ha dicho en ocasiones anteriores el pH adecuado en el transcurso de una digestión, es uno de los principales problemas que debe evitarse en el proceso en cuestión.

Javier Pérez ⁸⁹ determina que los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación. Parece ser que el pH afecta fundamentalmente a la actividad enzimática de los microorganismos mediante: cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como el carboxil y amino; alteración de los componentes no ionizables del sistema como por ejemplo el substrato; y desnaturalización de la estructura protéica de las enzimas. Para que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar alrededor de 7, se presentan problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3. Sin embargo, el proceso de inhibición parece ser completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración.

Realizando una comparación entre lo dicho por Javier Pérez y los resultados obtenidos, se encuentra que los valores de pH en el biodigestor presentan condiciones adecuadas para el buen funcionamiento de la planta, a lo que se

⁸⁸ FRIEDRICH, Francisco. La energía de la biomasa: procesos de transformación de la biomasa en energía. [en línea] < https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm > [Citado en 10 de noviembre de 2017]

⁸⁹ MEDEL, Javier .Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Componentes presentes en el biogás y sus efectos. Memoria para optar el título de ingeniero civil mecanico.Santiago de Chile. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas.2010.83 h.

atribuye los desechos usados en la alimentación con su respectiva proporción de agua.

4.2.3 Análisis del contenido de Metano. Este análisis se realizó bajo el mismo procedimiento expuesto en la sección 2.4. **La cromatografía de gases se realizó** con el objetivo de verificar el aumento del porcentaje de metano presente en el biogás como resultado de las mejoras que se realizaron en el sistema, luego de seleccionar la más conveniente. El Análisis fue llevado a cabo en los laboratorios de la facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia. Mediante este análisis se puede calcular porcentaje (%Vol.) de Hidrógeno y metano, siendo el último el gas de interés.

Al igual que en las pruebas anteriormente realizadas, las condiciones bajo las que se llevó a cabo la toma de las muestras del gas no son las pertinentes, teniendo en cuenta que se utilizaron bolsas de suero, las cuales no cuentan con las mismas características que una bolsa Tel Pac utilizadas normalmente para la recolección de muestras en estado gaseoso. Por otro lado, no se cuenta con un protocolo adecuado para realizar el muestreo debido a las condiciones de ubicación del biodigestor. Los resultados obtenidos se exponen a continuación en la tabla N° 27.

Tabla 26.Resultados

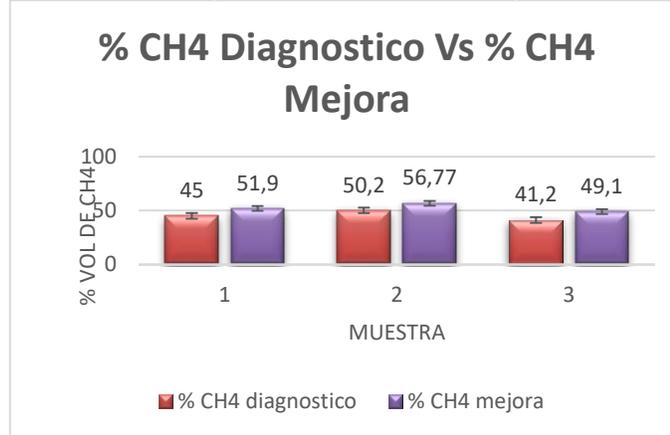
MUESTRA	%Vol. Metano			
	1	2	3	PROMEDIO
LIQ063B	51,9	56,7	49,1	53
MUESTRA	%Vol. Hidrogeno			
	1	2	3	PROMEDIO
LIQ063B	n.d	n.d	n.d	n.d
n.d no detectado, por debajo del límite de detección (<0,5% v/v)				

Fuente: Universidad Nacional de Colombia, laboratorio de ingeniería química.

En los resultados obtenidos se evidencia claramente un aumento significativo en el contenido de metano presente en el biogás, superando el valor establecido para inflamabilidad (45%) para las tres muestras analizadas. Con esto se puede decir que el gas obtenido, luego de realizarse la mejora seleccionada es adecuado para la utilización como fuente de energía en los hogares seleccionados por la CAR. Por otra parte, la cromatografía no detecta Hidrógeno por debajo del límite de detección (<0,5% v/v).

Para fines de comparación entre el porcentaje de metano antes y después de la mejora, se plantea un gráfico comparacional exponiendo los valores obtenidos mediante la cromatografía y de esta manera observar claramente que el metano aumentó luego de realizarse la mejora seleccionada.

Grafica 8.Comparación de Porcentaje de Metano



Con lo que se puede decir, que se obtuvo un aumento cercano al 8 % Vol. En el contenido de metano en el biogás producido. De esta manera se dice que las mejoras realizadas, son beneficiosas para la producción del gas y que el aumento obtenido es directamente proporcional a dichas mejoras. Un estudio realizado para un caso similar presenta un aumento cercano al 6 %Vol. Donde la cromatografía realizada en el diagnóstico, arroja un contenido de metano de 58,3 %Vol. Y luego de implementarse el prototipo con mejoras al sistema se obtuvo un contenido de 64,2 % Vol.⁹⁰

4.2.4 Temperatura. Como se observó en el diagnóstico la temperatura es uno de los parámetros que no se altera de ninguna manera con la implementación de la alternativa de mejora, pues realizando la medición en el sitio con ayuda del equipo especificado su valor promedio encontrado fue de 30°C

4.2.5 Prueba de inflamabilidad. Observando los resultados obtenidos de la cromatografía, se realiza la prueba de inflamabilidad con el fin de determinar si el gas resultante, es apto para la utilización en las estufas suministradas por la CAR. Viendo que el porcentaje obtenido en las tres muestras y el promedio supera el 45%, se puede realizar esta prueba con el objetivo de obtener llama.

⁹⁰ BERNAL, Daniela, QUINTERO, Daniela. Desarrollo de una propuesta de mejora para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el Recodo .Fundación Universidad de America.Facultad de Ingenierias.2016.76 p.

Figura 15. Prueba de llama



En la figura 15, se evidencia la formación de fuego bajo condiciones adecuadas, es decir sin presencia de monóxido de carbono lo que es conveniente para el éxito del sistema.

Para concluir y hacer un resumen de este capítulo se realiza una comparación de los resultados obtenidos en la tabla 28, mediante la mejora seleccionada y aplicada, con la información de estudios realizados en producción de biogás, con el fin de afirmar que la implementación de la mejora trajo consigo beneficios en el sistema analizado.

Tabla 27. Datos obtenidos

Resumen	Obtenido	Según bibliografía
Relación FOS/TAC promedio	0.45	0.4 – 0.6 ⁹¹
pH promedio	7.56	6.6 – 7.6 ⁹²
Temperatura	30	25 – 45 ° C ⁹³
Contenido de metano	53 % Vol.	> 45% Vol. ⁹⁴

⁹¹ LESSIE, Ulrich, PUTZ, Pietra. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Planta de biogás de Wambeln.

⁹² FRIEDRICH, Francisco. La energía de la biomasa: procesos de transformación de la biomasa en energía. [en línea] < https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm > [Citado en 10 de noviembre de 2017]

⁹³ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 38 p.

⁹⁴ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 38p.

4.3 Especificaciones técnicas. Teniendo en cuenta que el proceso de producción de biogás, se realiza en condiciones artesanales y es dependiente de la disponibilidad de recursos a utilizar como materia orgánica es necesario plantear diversas especificaciones técnicas, con el fin de mantener la producción de biogás bajo cualquier circunstancia que se presente y a su vez aumentar la cantidad de gas producido.

4.3.1 Carga en función de materias primas: Como bien se sabe el biodigestor se encuentra ubicado en el municipio de Jerusalén (Cundinamarca) en la zona rural. El proceso de operación está a cargo de las personas que habitan la casa donde se encuentra instalada la planta.

Debido a la ubicación del biodigestor y las actividades realizadas por la familia “agricultura, ganadería, labores del hogar”, los recursos más utilizados son el excremento de ganado vacuno y porcino, además de residuos del maíz producto de la siembra y residuos provenientes del hogar, teniendo en cuenta que dicha familia se dedica a la venta de ganado y demás productos no siempre se cuenta con la misma cantidad de determinada materia prima, por lo que se propone una tabla de relación carbono-nitrógeno “C/N”, que expone los porcentajes y la relación indicada para cada tipo de residuo, con el fin de suplir las necesidades que se puedan presentar en la tabla No 29.

Tabla 28. Valores promedios aproximados de la relación C/N de los residuos presentes en el hogar

Residuo	%C	%N	Relación C/N
Vacuno	30	1.30	25:1
Porcino	25	1.50	16:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Rastrojo de maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 30 de octubre 2017.

4.3.2 Parámetros de operación. En estos parámetros se abarca todo lo relacionado a las condiciones de operación del sistema analizado como lo son: “pH, mezclado, temperatura, tiempo de retención, sólidos” (Columna A), para ello se presenta una tabla (No 30) con las condiciones actuales de funcionamiento (Columna B) con relación a las condiciones óptimas según bibliografía (Columna C).

Tabla 29. Comparación de parámetros actuales con respecto a bibliográficos

A	B			C				
ph promedio	7.809 promedio 6 mediciones			7.8 - 8.2 (Metanogénicos)				
Mezclado		% C	% N	C/N Obtenido		% C	% N	C/N recomendado
	Vacuno (50kg)	30	1.30	20:1.	Vacuno (30kg)	30	1.30	entre 30:1 hasta 20:1
	porcino (15kg)	25	1.50		porcino (30kg)	25	1.50	
	hortalizas(20kg)	30	1.80		hortalizas(30kg)	30	1.80	
	legumbres(15kg)	30	1.50		legumbres(30kg)	30	1.50	
Temperatura	30 °C promedio 4 mediciones			25°C - 35°C Temperatura óptima				
tiempo de retención	30 días			30-40 días en zona tropical "America"				

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. Recuperado 21 de noviembre 2017.

Para el mezclado se debe tener en cuenta la siguiente información y la ecuación 5 que soluciona la relación C/N obtenido, para el caso de la (Columna B).

Ecuación 5. Relación C/N

$$\frac{C}{N} = \frac{C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_2 + C_3 \cdot Q_3 + C_4 \cdot Q_4}{N_1 \cdot Q_1 + N_2 \cdot Q_2 + N_3 \cdot Q_3 + N_4 \cdot Q_4}$$

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = peso fresco de cada materia prima expresado en kilogramos.⁹⁵

4.4 DETERMINACIÓN EN PESO DE EFLUENTES O LODOS

Para este procedimiento se realiza un balance de masa simple, teniendo en cuenta las variables conocidas, y se realiza una simplificación debido a que la alimentación se realiza de manera intermitente por lo que se tomara en estado estacionario. Para este caso el alimento al sistema será expresado en kg y el volumen de biogás expresado en m³. Además de tener en cuenta la temperatura y la presión a la que se produce el gas, para el caso de la temperatura se tiene un estimado de 30° C y para la presión se calculara mediante la fórmula de gas ideal.

Ecuación 6. Expresión gases ideales

$$PV = nRT$$

Donde:

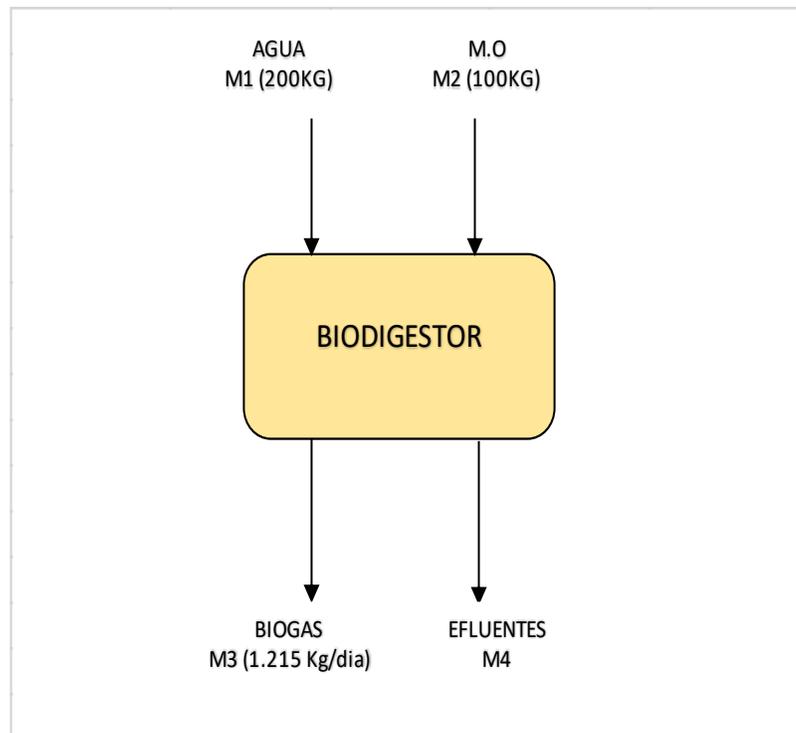
⁹⁵ MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile. 2011. 119 Pg.

P: presión
V: volumen
n: mole
R: constante de los gases
T: temperatura

$$P = \frac{n}{V}RT$$

$$P = \frac{0.0757 \text{ kmol}}{1 \text{ m}^3} \times 0.082 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \times 303.15 \text{ K}$$

$$P = 1.8 \text{ atm}$$



Como bien se sabe la cantidad de gas obtenido en el proceso se expresa en unidades de volumen, por lo que se debe realizar una operación, para determinar su equivalencia en peso, para este caso en kg. Para la realización de este procedimiento se consulta la densidad del biogás y se realiza un promedio (1.215 kg/m³)⁹⁶ y se procede a operar de la siguiente manera.

⁹⁶ BIOGAS [Anónimo]. [en línea]. <http://zorg-biogas.com/biogas-plants/biogas?lang=es> .Recuperado 22 de noviembre de 2017

Ecuación 7. Densidad
biogás

$$\delta = \frac{m}{v}$$
$$m_2 = \delta \cdot v$$

$$m_2 = 1.215 \frac{kg}{m^3} \times 1 \frac{m^3}{dia} = 1.215 \frac{kg}{dia}$$

Partiendo de la ecuación 6

$$M_1 + M_2 = M_3 + M_4 \quad (6)$$

$$100 \frac{kg}{dia} + 200 \frac{kg}{dia} = 1.215 kg + M_4$$

$$M_3 = 300 \frac{kg}{dia} - 1.215 \frac{kg}{dia}$$

$$M_3 = 298.8 \frac{kg}{dia}$$

La cantidad de lixiviados por día se determina mediante un balance de masa, donde se conoce la producción diaria de metano (m^3), donde para conocer su equivalencia en masa se utiliza su densidad y se despeja de la ecuación expuesta anteriormente y la carga total alimentada al biodigestor de materia orgánica.

Como resultado del balance se obtiene el peso de los lixiviados por día, obtenidos en el proceso de producción del biogás, estos lodos son utilizados como fertilizante del suelo que compone el hogar donde se encuentra ubicado el biodigestor.

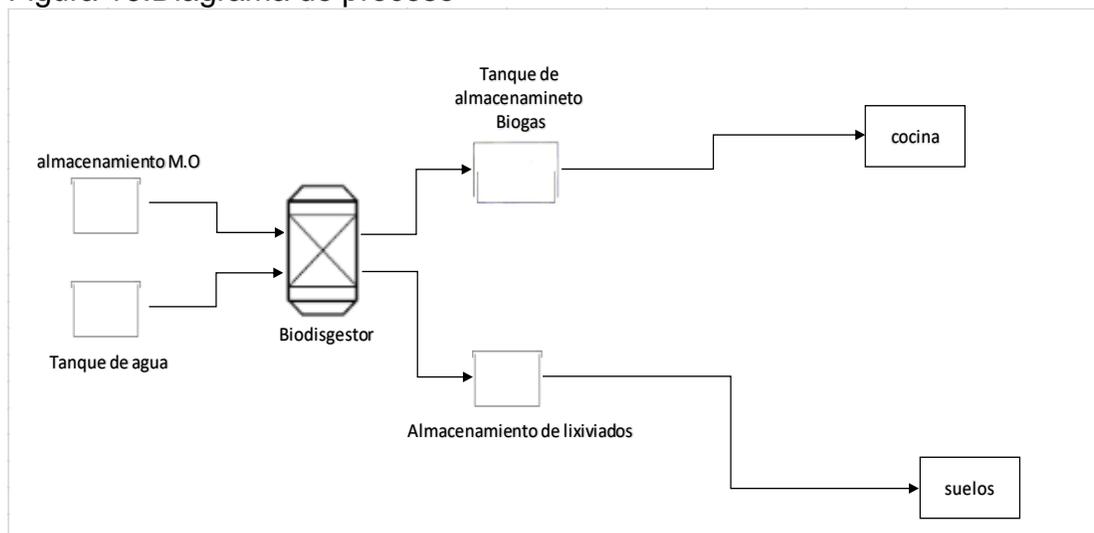
Es importante el aprovechamiento de los lixiviados como subproductos, sabiendo que por medio de estos se abonan las plantaciones presentes en el lugar, aportando compuestos y microorganismos beneficiosos para mejorar el crecimiento y previniendo enfermedades⁹⁷

4.5 DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DEL PROCESO

A continuación, se presenta el proceso realizado, desde el almacenamiento de los recursos, hasta la distribución de los lixiviados utilizados como fertilizante de suelos y la previa distribución del gas a la cocina.

⁹⁷ BUCHE, Troy. Uso del lixiviado de compost en sustratos. [en línea] Disponible en: <http://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/uso-del-lixiviado-de-compost-en-sustratos/> Recuperado en 25 de Noviembre de 2017.

Figura 16. Diagrama de proceso



4.5.1 Etapas del proceso.

- Almacenamiento y recepción de la materia prima. Se implantó un sistema de recolección que consiste en reunir los desechos, es decir el estiércol tanto porcino como vacuno, además de los residuos orgánicos generados en las labores del hogar y el agua requerida para acondicionar la materia orgánica y almacenarlo en tanques para el uso en la alimentación del biodigestor. Dicha alimentación se realiza por medio de una espátula la cual facilita el ingreso de la materia orgánica por el tubo hacia el tanque.
- Acondicionamiento de los desechos orgánicos: Para que la producción de biogás se realice en las condiciones adecuadas, a la materia orgánica se le realiza un proceso de acondicionamiento antes de entrar al tanque al proceso de fermentado, por lo tanto, dicho procedimiento consiste en preparar la mezcla con la relación indicada 20:1 (materia orgánica: agua) y controlando el p H el cual debe encontrarse entre 6,8 y 7,2, luego de esto se procede a alimentar el tanque con la mezcla preparada.
- Carga de alimentación. Al igual que en el proceso de diagnóstico, se debe calcular el agua a añadir, para la dilución de la mezcla, teniendo en cuenta la relación planteada en la mejora establecida 1:2, por lo que al plantear la relación se obtiene $100 \times 2 = 200$ L de agua para la dilución de la mezcla.

Ecuación 8. Carga de alimentación

$$carga \frac{m^3}{dia} = 100 + 200 = 300 \frac{L}{dia} = 0.3 \frac{m^3}{dia} \quad (7)$$

- Proceso de fermentación. Después de tener la mezcla con las condiciones establecidas, se dirige al biodigestor como se observa en la figura 16 en el que se llevara a cabo la fermentación anaerobia, se controlan las variables de operación “temperatura, carga y pH”, si se presentan anomalías se realizan ajustes si se considera necesario.
- Volumen de gas esperado. El volumen se estima por medio de las ecuaciones que se presentan a continuación:

De acuerdo con la ecuación 1

$$ST = \frac{\text{carga diaria} * 0,17}{V_R} \quad (1)$$

$$ST = \frac{100 \text{ kg} * 0,17}{1 \text{ m}^3} = 17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ dia}}$$

Dónde:

SV=Solidos volátiles

V_R =Volumen del reactor

0,17 = 17% sólidos totales

Partiendo de la Ecuación 2:

$$SV = ST * 0,77 \quad (2)$$

Dónde:

SV= Sólidos Volátiles

ST=Sólidos Totales

$$SV = 17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,77$$

$$SV = 13,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ dia}}$$

PB=Producción de Biogás

SV=Sólidos Volátiles

V_m = Volumen de carga

$$PB = 0,27 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * 13,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ dia}} * 0,3 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$PB = 1,0 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} * 20 \text{ dias} = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

La producción de gas obtenida en el hogar de instalación del biodigestor es de $1,0 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$ con un equivalente al mes de $20 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$. Teniendo en cuenta que la familia no

realiza el proceso de carga los 30 días del mes, con lo que se observó se determina 20 días de alimentación. La producción se considera buena, teniendo en cuenta el consumo anual en promedio de una familia del municipio (tabla 33), que al día tiene una equivalencia de $0,24 \frac{m^3}{dia}$, por lo que se considera satisfactoria.

5. EVALUACIÓN FINANCIERA

Se realizó la respectiva evaluación financiera con el fin de identificar la viabilidad del proyecto teniendo en cuenta, tanto gastos operacionales como inversiones que requiere implementar la mejora en el biodigestor. Se evaluaron dos escenarios uno sin proyecto y otro con proyecto.

En primer lugar, para obtener los valores relacionados a costos e inversiones, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Mano de obra
- Adecuación de materia prima
- Materia prima
- Costos activos (adquisición de equipos y materiales)

La evaluación financiera se calculó a partir de la tendencia de los últimos años del consumo de gas, tomando como referencia la población de Tocaima (Cundinamarca), esto debido a que la vereda de Jerusalén donde se ubica el proyecto se encuentra en la zona rural y no cuenta con información de primera mano. Por lo tanto, para el análisis financiero se realizó una proyección a 5 años del consumo de la vivienda donde está ubicado el proyecto.

5.1 INVERSIONES DE CAPITAL (CAPEX)

Es la abreviatura de la expresión en inglés de *Capital Expenditure*, que en español significa inversiones de capital. Dicho término se define como los gastos, o las inversiones realizadas, en la mejora de los bienes de capital o activos físicos.⁹⁸

De este modo, el CAPEX se define como las inversiones que se realizan en los diferentes equipos, con el fin de aumentar los niveles de producción, del mismo modo para mantener el funcionamiento de un sistema en particular.

Para realizar la alternativa de mejora en el biodigestor ubicado en el municipio de Jerusalén (Cundinamarca), a continuación, se mencionan los recursos necesarios para llevar a cabo el proceso.

- Caneca: Necesaria para realizar la recolección de desechos orgánicos en el lugar de instalación del biodigestor, para posteriormente tomar las muestras necesarias.
- Espátula: Dispositivo utilizado para la recolección de muestras de desechos orgánicos.
- Balanza: Necesaria para pesar la cantidad de biomasa a alimentar.

⁹⁸ AMENDOLA, Luis. Impacto de los capex y opex en la gestión de activos. [en línea].2016...Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-la-gesti%C3%B3n-activos-amendola> . Recuperado en 15 de noviembre de 2017.

- Equipo dosificador: Útil al momento de hacer el muestreo del biogás con las bolsas de suero.
- Tubo PVC: Necesario para reparar el sistema de agitación y el tubo de alimentación.
- Tornillo y Arandela: para realizar el respectivo empalme en el sistema de agitación
- Cinta Teflón: Utilizada para sellar uniones.
- Silicona Fría: Necesaria para sellar de manera segura los acoples de manguera a la bolsa de suero y demás uniones donde sea necesario fijar,
- Botellas: Se requieren en el sistema de drenaje.
- Capacitación/h: Respecto a la recolección de desechos orgánicos y buen funcionamiento del biodigestor.
- Neumáticos: Necesarios para realizar los empaques en las diferentes tuberías,
- Manguera Swan: Modificar conexiones de gas.
- Acople de Manguera: Utilizados en las bolsas de suero para poder hacer el empalme de la bolsa de suero a la conexión del biogás.

5.2 GASTOS OPERACIONALES (OPEX)

Este término deriva de *Operational Expenditure* en español gastos operacionales, se define como los costos asociados al mantenimiento de los equipos, incluyendo los gastos consumibles y demás gastos necesarios para llevar a cabo una actividad.⁹⁹ Cabe mencionar que dentro de los gastos operacionales se encuentran los siguientes rubros de evaluación:

- Adecuación de materia prima
- Mantenimiento
- Mano de obra

5.3 CLASIFICACIÓN DE COSTOS

Teniendo en cuenta las definiciones y conceptos que abarca el CAPEX y OPEX, se realiza una tabla donde se exponen y se clasifican los costos realizados, para cumplir los objetivos planteados para el desarrollo del proyecto, con base a la alternativa de mejora seleccionada en el capítulo 2 mediante la matriz de selección o análisis multicriterio (Tabla 24).

⁹⁹ AMENDOLA, Luis. Impacto de los capex y opex en la gestión de activos. [en línea].2016...Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-la-gesti%C3%B3n-activos-amendola> . Recuperado en 15 de noviembre de 2017.

Tabla 30. CAPEX

Activo	Costos Capex		Valor total
	und/requeridas	Valor/unidad	
1. Caneca	2	\$9.000	\$18.000
2. Espátula	2	\$5.000	\$10.000
3. Balanza	1	\$40.000	\$40.000
4. Equipo dosificador	1	\$8.000	\$8.000
5. tubo PVC	4	\$4.000	\$16.000
6. Tornillo	1	\$2.000	\$2.000
7. Arandela	2	\$600	\$1.200
8. Tuerca	1	\$1.500	\$1.500
9. Silicona fría	2	\$10.000	\$20.000
10. Botellas	4	\$200	\$800
11. Capacitación / h	12	\$4.000	\$48.000
12. Neumáticos	5	\$1.000	\$5.000
13. Manguera swan / m	5	\$4.000	\$20.000
14. Acople de manguera	8	\$1.000	\$8.000
Total, Capex			\$198.500

Tabla 31. OPEX

Opex		
Operación		valor \$ / m3 gas
Adecuación de materia prima		
Tiempo / día en horas	1	
Valor hora	\$0	
Unid. requeridas Kg/m3 gas	100	\$0
m3 producidos / día	1	
Mantenimiento		
costo hora hombre	\$500	Valor mant. \$ / m3 gas
cantidad (servicio) / año	12	
horas / cada servicio	3	
total año	\$18.000	\$900
m3 producidos / mes	20	
Mano de obra		
SMLV	\$737.717	valor M.O \$ / m3 gas
Horas de servicio / día	0,5	
Horas de servicio / mes	15	
m3 producidos / día	1	\$49.181
valor hora / día	\$49.181	
Total Opex / m3		\$50.081

5.4 CÁLCULO DE LA TIO (Tasa interna de oportunidad)

La tasa interna de oportunidad también denominada tasa mínima de descuento, es la tasa mínima a la cual el inversor de un proyecto cualquiera está dispuesto a ganar en el mismo.¹⁰⁰ Si se trata de un proyecto nuevo y se va a financiar con aportes de los mismos creadores de este, la TIO en este caso será la tasa de interés que se está ganando donde se depositó el capital.¹⁰¹

Para nuestro proyecto es necesario calcular la tasa interna de oportunidad (TIO), a partir de la tasa de inflación (INF) equivalente al 3%¹⁰² y el depósito a término fijo (DTF) equivalente a 5,35%¹⁰³, información obtenida del banco de la república. Con esta información se procede a realizar el siguiente cálculo:

Ecuación 9. Cálculo de la TIO¹⁰⁴

$$TIO = (1 + DTF)(1 + INF) - 1$$

$$TIO = (1 + 0,0535)(1 + 0,03) - 1$$
$$TIO = 0,085 = 8,5 \%$$

5.5 ESTIMACIÓN CONSUMO DE GAS

La evaluación financiera para el escenario sin proyecto, se realizó obteniendo la tendencia de consumo de gas de los últimos 5 años de la población de Tocaima, haciendo una relación con el costo de un cilindro de gas propano, para luego proyectar hacia un futuro.

¹⁰⁰ FINANZAS INTERNACIONALES. [Anónimo]. [en línea]. <http://manejatusfinanzas.blogspot.com.co/p/evaluacion-de-la-inversion.html> .Recuperado 24 de noviembre de 2017

¹⁰¹ FINANZAS INTERNACIONALES. [Anónimo]. [en línea]. <http://manejatusfinanzas.blogspot.com.co/p/evaluacion-de-la-inversion.html> .Recuperado 24 de noviembre de 2017

¹⁰² BANCO DE LA REPUBLICA. Indicadores económicos.[en línea].Disponible en <http://www.banrep.gov.co/>.Recuperado EN 22 de noviembre de 2017

¹⁰³ BANCO DE LA REPUBLICA. Indicadores económicos. [en línea].Disponible en <http://www.banrep.gov.co/> Recuperado en 22 de noviembre de 2017.

¹⁰⁴ FINANZAS INTERNACIONALES. [Anónimo]. [en línea]. <http://manejatusfinanzas.blogspot.com.co/p/evaluacion-de-la-inversion.html> .Recuperado 23 de noviembre de 2017

Ecuación 10. kilogramos de gas en un cilindro de propano comercial

$$33 \text{ libras} * \frac{0,453592 \text{ kg}}{1 \text{ libra}} = 15 \text{ kg}$$

Primero es necesario hacer una equivalencia, en cilindros de gas propano comercial de (15 kg)¹⁰⁵, para calcular cuántos cilindros hacen un metro cúbico, para posteriormente poder relacionarlo con el precio. Para proceder con los cálculos pertinentes, es necesario conocer la densidad del gas propano (1,87 kg/m³)¹⁰⁶. Ahora a partir de la expresión $\rho = \frac{m}{V}$ se despeja la masa, teniendo como datos ya conocidos la densidad y el volumen.

$$m = \rho * V$$

$$m = 1,87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1 \text{ m}^3$$

$$m = 1,87 \text{ kg}$$

Conociendo este valor, se puede realizar el cálculo, para determinar la cantidad de cilindros equivalentes a 1m³. Sabiendo que 1m³ de propano equivale a 1,87 kg y que el valor por cilindro de 15 kg es de \$58.822, se determina que es necesario 1 cilindro de gas de (15 kg) para tener la medida correspondiente al metro cúbico de gas, con un costo estimado de \$ 58.822 /m³ de gas propano. Por otra parte, es necesario conocer el consumo de gas al año, para de esta manera generar una tendencia, para ello como se mencionó anteriormente se cuenta con el consumo de la población de Tocaima. Como se requiere el consumo de la vivienda es necesario dividir el consumo total por los habitantes del municipio (18.387)¹⁰⁷, y de esta manera obtener el consumo por persona.

Teniendo en cuenta que en la vivienda evaluada habitan cuatro personas, se toma el valor obtenido de consumo por persona y se multiplica por el número de habitantes, todo esto se expone con mayor claridad en la tabla 33.

¹⁰⁵ VIDA GAS. Lista de precios. [en línea]. Disponible en <http://www.vidagas.co/secciones-142-s/listas-de-precios.htm>. Recuperado en 22 de Noviembre de 2017.

¹⁰⁷ ALCALDIA DE TOCAIMA(CUNDINAMARCA). Sitio oficial de Tocaima, [en línea]. Disponible en <http://www.tocaima-cundinamarca.gov.co/index.shtml> . Recuperado en 23 de Noviembre de 2017

Tabla 32. Tendencia anual consumo de gas Tocaima (Cundinamarca).

Año	consumo(m3)/año Tocaima	consumo (m3) año/ persona	consumo (m3) año hogar
2013	393300	21,39	85,56
2014	356952	19,41	77,65
2015	416361	22,64	90,58
2016	425159	23,12	92,49
2017	360913	19,63	78,51

Fuente: SUI. Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios [en línea]. <http://www.sui.gov.co/SUIAuth/logon.jsp>

5.6 EVALUACIÓN FINANCIERA

5.6.1 Flujo de caja escenario sin proyecto. Para calcular el flujo de caja a 5 años, es necesario calcular el costo por año, del cilindro de gas por el consumo realizado en cada año, se determina de la siguiente manera (Tabla 34).

Tabla 33. Flujo de caja sin proyecto

año	sin proyecto				
	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
consumo (m3/año)	85,56	77,65	90,58	92,49	78,51
costo m3 (gas propano)	\$58.822	\$58.822	\$58.822	\$58.822	\$58.822
Total	\$5.032.83	\$4.567.71	\$5.327.93	\$5.440.51	\$4.618.39
	7	2	5	8	9

5.6.2 Flujo de caja con proyecto. De igual manera se procede a calcular el costo por año, teniendo como referencia el consumo de gas en la vivienda, la inversión realizada (CAPEX) y el valor que requiere producir 1m³ de biogás (OPEX), para ello se plantea el siguiente flujo (Tabla 35):

Tabla 34 . Flujo de caja con proyecto

año	año 0	Con Proyecto				
		año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
consumo (m3/año)		85,56	77,65	90,58	92,49	78,51
inversión inicial	-\$198.500					
costo m3 (biogás)		\$50.081	\$50.081	\$50.081	\$50.081	\$50.081
Total	-\$198.500	\$4.284.953	\$3.888.946	\$4.536.200	\$4.632.053	\$3.932.101

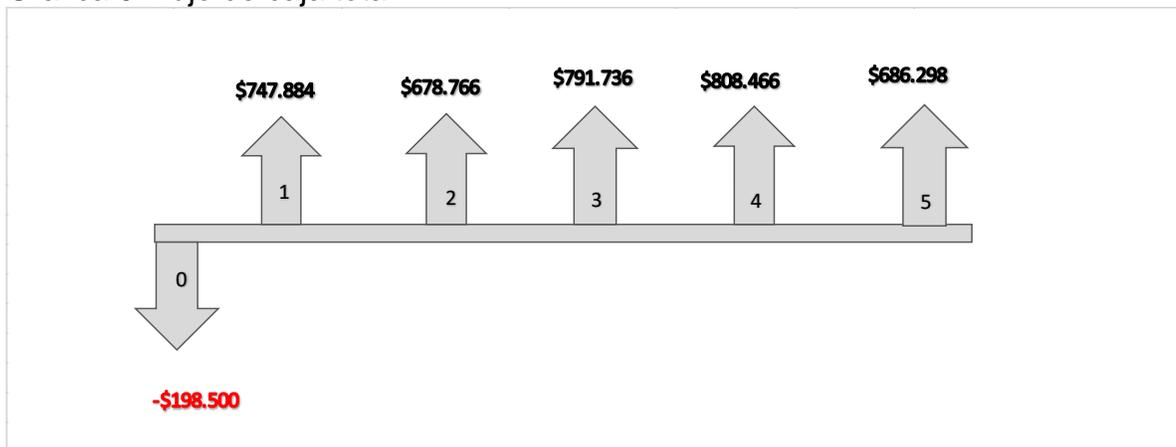
5.6.3 Flujo de caja total. Con los flujos de caja realizados tanto para escenario sin proyecto como para escenario con proyecto, se realiza un análisis de beneficio, teniendo en cuenta la diferencia obtenida entre los flujos de caja de la (tabla 33) y (tabla 34), y se refleja en la siguiente tabla. (Tabla 36).

Tabla 35. Flujo de caja beneficio

año	Flujo Total (beneficio)					
	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
sin proyecto		\$5.032.837	\$4.567.712	\$5.327.935	\$5.440.518	\$4.618.399
con proyecto	\$198.500	\$4.284.953	\$3.888.946	\$4.536.200	\$4.632.053	\$3.932.101
beneficio	\$198.500	\$747.884	\$678.766	\$791.736	\$808.466	\$686.298

Para el caso del flujo de caja beneficio, las flechas con dirección hacia arriba, significan el beneficio obtenido, y la que está en dirección hacia abajo, representa la inversión realizada.

Grafica 9. Flujo de caja total



5.6.4 Cálculo de VPN. Es uno de los métodos más conocidos para evaluar proyectos de inversión a largo plazo y permite tomar decisiones acerca de la rentabilidad del proyecto. El VPN nos permite traer el valor futuro a un valor presente mediante los ingresos y egresos según sea el caso, evaluados a una tasa de interés de oportunidad.¹⁰⁸

Para calcular el VPN:

Ecuación 11. Cálculo VPN¹⁰⁹

$$VPN = \frac{FE_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

VPN=Valor presente neto

¹⁰⁸ ENCICLOPEDIA FINANCIERA [Anónimo]. [en línea]. <http://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/valor-presente-neto.htm> .Recuperado 24 de noviembre de 2017

¹⁰⁹ VALOR PRESENTE NETO [Anónimo]. [en línea]. <http://tiie.com.mx/valor-presente-neto/> .Recuperado 23 de noviembre de 2017

FE=Flujo de efectivo en el periodo t
i= Tasa de interés o costo de oportunidad
t= período

$$VPN = -\$198.500 + \$ 747.884 (1 + 0,085)^{-1} + \$ 678.766(1 + 0,085)^{-2} + \$ 791.736 (1 + 0,085)^{-3} + \$ 808.466(1 + 0,085)^{-4} + \$ 686.298 (1 + 0,085)^{-5}$$
$$VPN = \$2.512.396$$

5.7 EVALUACIÓN BENEFICIO /COSTO (B/C)

Teniendo el valor correspondiente al VPN (beneficios) y costos e inversiones se calcula la relación beneficio/costo

Ecuación 12. Relación B/C

$$B/C = \frac{VPN \text{ beneficios}}{\text{costos e inversion}} \quad \boxed{\phantom{B/C = \frac{VPN \text{ beneficios}}{\text{costos e inversion}}}}$$

$$B/C = \frac{\$2.512.396}{\$198.500}$$

$$B/C = 13$$

A partir de los parámetros tenidos en cuenta al momento de analizar la relación B/C y al determinar que es mayor a 1 puede considerarse, que los beneficios superan los costos establecidos dentro del proyecto¹¹⁰ y por lo tanto el mismo es viable; de igual modo se concluye que la implementación de biodigestores y con éstos las mejoras realizadas son muy eficaces y útiles pues no se generan tantos gastos como los realizados con los cilindros de gas propano comercial.

¹¹⁰ GESTIOPOLIS. [Anónimo].Calculo de la relación Beneficio-Coste (B/C) [en línea]. <http://tiie.com.mx/valor-presente-neto/> .Recuperado 23 de noviembre de 2017

6. CONCLUSIONES

- De acuerdo a lo observado en el sitio donde se encontraba ubicado el biodigestor, se identificó que las condiciones como se realizaba el proceso de biodigestión eran muy artesanales, teniendo en cuenta que operaciones como la recolección de desechos orgánicos, la alimentación y agitación junto con la deficiente instalación de conexiones y tuberías, estaban afectando el proceso de producción de biogás. Se realizaron dos análisis: la relación FOS/TAC para la biomasa y una cromatografía de gases para la cuantificación de metano; dando como resultado para el diagnóstico que el porcentaje de metano presente era de 45,5% vol, y que haciendo referencia a la bibliografía se encuentra fuera del valor ideal para que el biogás sea inflamable.
- A partir de las condiciones de operación observadas, se propusieron las posibles alternativas de mejora al sistema teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos y aplicabilidad en el proceso. Para la determinación de la alternativa a implementar, se establecen unos criterios de selección y posteriormente se aplica el método de sumas ponderadas obteniendo como resultado la alternativa que abarcó la modificación de recolección de desechos con otras materias primas, mejorar las cantidades de carga al biodigestor, reestructuración en el sistema de agitación y la implementación de empaques en las conexiones y uniones requeridas, teniendo en cuenta que la selección de esta alternativa llevara a cabo el objetivo basado en la mejora del proceso de producción en el sistema de biodigestion.
- Se evaluó la alternativa implementada mediante pruebas de laboratorio para conocer el contenido de metano, y relación FOS/TAC, obteniendo como resultados al realizar las mejoras implementadas un valor de 53% vol y 0,45 respectivamente, indicando que las alternativas implementadas con los parámetros analizados permitieron una mejora en el proceso de producción de biogás llevado a cabo en el municipio. Finalmente, al analizar los parámetros obtenidos en el diagnóstico y luego de la mejora, se refleja un aumento cercano al 8% en el contenido de metano, comparando con los resultados obtenidos en la etapa de diagnóstico, lo que significa que la implementación de alternativas de mejora en el sistema de biodigestión influyo en el funcionamiento y operación del biodigestor ubicado en la vereda el Hatillo, generando biogás de buena y alta calidad.
- A partir de la evaluación financiera, se hizo el análisis correspondiente de gastos e inversiones teniendo en cuenta tanto la implementación del proyecto, como la no implementación del mismo a partir de la cual se pudo concluir que un reemplazo

en el sistema de gas propano comercial por los biodigestores, sería muy benéfico para la población del municipio. Adicionalmente el valor para la relación B/C fue de 13 concluyendo que el proyecto es viable.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda prestar mucho cuidado a cada una de las mejoras implementadas para que la producción de biogás siga siendo de buena calidad y a su vez su funcionamiento no se vea alterado.
- Se recomienda analizar una alternativa para implementar al sistema de digestión el mezclado, previniendo el aumento de costo de implementación del proceso, asegurando una velocidad constante para beneficiar la degradación de materia orgánica dentro del reactor.
- Se recomienda realizar pruebas más exigentes respecto a la biomasa que ingresa en el biodigestor (DQO y DBO).
- Se recomienda realizar un estudio de la digestión anaerobia agregando al sustrato otro residuo, ya sea agrícola o sólido generado, para analizar los resultados que se obtendrían en cuanto a calidad y cantidad de biogás.
- Se recomienda a partir de los resultados de este proyecto, establecer en futuros trabajos el proceso de purificación de biogás para que pueda ser empleado posteriormente en motores u otros sistemas de generación de energía eléctrica, debido a que puede obtener metales pesados y compuestos tóxicos en porcentajes mínimos, pero capaces de causar daños a la salud humana.
- Para un análisis a través de un supuesto de normalidad se recomienda realizar nuevas mediciones de la composición del biogás para el análisis del efecto de las variables sobre la producción de biogás.

BIBLIOGRAFIA

[Anónimo]. Agitación y mezcla de fluidos. Proyecto Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Cuautitla. 2017. 35 p.

[Anónimo]. Carbotecnía. Sólidos totales disueltos. 2014. Disponible en: <https://goo.gl/zRRCmx>

[Anónimo]. Concepto.de: Concepto de pH. Disponible en <http://concepto.de/ph/>

[Anónimo]. Ecobiogas. Especialistas en planta de biogás. Disponible en: http://www.ecobiogas.es/archivos/es/biogas_biogasienergia.php

[Anónimo]. Plantas de biomasa. ¿Qué es la biomasa? .57 p

[Anónimo]. Digestión Anaerobia. [en línea]. Disponible en: <https://goo.gl/Qk9aF9>

AMENDOLA, Luis. Impacto de los capex y opex en la gestión de activos. [En línea]. 2016. [Citado el 15 de noviembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-la-gesti%C3%B3n-activos-amendola>

ARBOLEDA, Yeison. SALCEDO, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Fundamentos sobre la tecnología del biogás. Universidad Nacional Sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración. Palmira. 2009

ARBOLEDA, Yeison; SALCEDO GONZALEZ, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Julio 2009.
BANCO DE LA REPUBLICA. Indicadores económicos. [en línea]. <http://www.banrep.gov.co/> Recuperado en 22 de noviembre de 2017.

BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Universidad Carlos III de Madrid escuela politécnica superior. 2010. Pg 20.

BERNAL, Daniela, QUINTERO, Daniela. Desarrollo de una propuesta de mejora para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el Recodo. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá. 2016. Pg 41-42.

Cáceres, Edgar. Producción de Biogás: Construcción de un biodigestor. [en línea]. <http://www.mailxmail.com/curso-produccion-biogas-construccion-biodigestor/biogas-produccion-diaria>. Recuperado en 17 de noviembre de 2017.

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL. Determinación de la relación FOS/TAC para una planta de biogás por titulación ácida. Bogotá: 2017, 13 p.

FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL .Manuales de energías renovables: Biomasa. El recurso biomásico. 1ra Edición. San José Costa Rica. 2002.

FRIEDRICH, Francisco. La energía de la biomasa: procesos de transformación de la biomasa en energía.[en línea] <https://goo.gl/ZsR5EB>.Recuperado 10 de noviembre de 2017

FUNDACION PARA EL DESARROLLO SOCIECONOMICO Y RESTAURACION AMBIENTAL. La relación C/N.Disponible en : <https://goo.gl/m6J5d6>

HILBERT, Jorge. Manual para la producción de biogás. Institución de Ingeniería rural. Castelar.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIONES. Requisitos generales y métodos de ensayo. NTC 2190. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 110 p.

_____. Normas colombianas para presentación de tesis, trabajo de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 110 p.

INSTITUTO PARA LA DIVERSION Y AHORRO DE ENERGIA (IDAE).Digestión anaerobia.Proceso de producción de biogás.BiodiSol.2017.Disponible en:<http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/>

INSTITUTO PARA LA DIVERSION Y AHORRO DE ENERGIA (IDEA). Generación de Biomasa. Costa Rica (IDAE). Recuperado 21 Septiembre de 2017.

LABORATORIO DE TECNICAS INSTRUMENTALES. Espectrometría de masas.2016

LESSIE, Ulrich, PUTZ, Pietra. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC. Wambeln. Recuperado 12 noviembre de 2017.

LOPEZ, Bárbaro. Análisis de Biodigestores. [en línea]. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo04.htm>

MANNISE, Raúl. Biodigestores. [En línea]. <https://ecocosas.com/energias-renovables/biodigestor/>. Recuperado 21 de septiembre de 2017.

MEDEL, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Santiago de Chile Recuperado 10 septiembre de 2017.

MELENDI,Daniel.Metano.Disponible en: <https://goo.gl/uEcB9X>

MINISTERIO DE ENERGIA. Manual de Biogás: Fundamentos de la fermentación metanogénica. Santiago de Chile.2011.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. [En línea]: https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23883779/300517_reporte_coberturas_2017-I_GAS_NATURAL_x_red.pdf/5e766197-b9c4-4479-89d1-a6e23dabcae4. Recuperado en 10 septiembre 2017

MOLINA, Sergio. Historia del Biogás. [En línea]. http://porcinos.blogspot.com.co/2006/01/historia-del-bio-gas_113857323502124249.html. Recuperado 21 de septiembre de 2017

MOORE, Carolina. Biodigestor: Estructura de un biodigestor. México. [En línea]. <http://biodigestor33.blogspot.com.co/>

OBSERVATORIO DE SALUD Y MEDIO AMBIENTE DE ANDALUCIA. Solidos Volatiles. Disponible en: <http://www.osman.es/diccionario/definicion.php?id=14067>

PAREDES, Alfredo. Mercadotecnia. Biodigestores [en línea] <http://mecnotecnia.blogspot.com.co>. Recuperado 10 septiembre de 2017.

PEREZ, Julian. Definición. de: Definición de estiércol. 2017 Disponible en <https://goo.gl/Bz6SKf>

PEREZ, Laura Patricia. MAGADA, Héctor. Métodos de biotecnología: Cromatografía de gases. Recuperado 3 de Octubre de 2017.

PEREZ, Laura Patricia. MAGADA, Hector. Metodo de biotecnología: Cromatografía de gases. [En línea]. 2004. [Citado en 19 de enero de 2017]. Disponible en internet http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/cromatografia_de_gases.pdf

PROPANO GAS. Factor de conversión de gas propano. [En línea]. <http://propanogas.com/faq/factor-conversion> Recuperado 22 de noviembre de 2017.

Revista digital ERENOVABLE. Biogás: El combustible alternativo. Enero, 2015. [en línea] <https://erenovable.com/biogas-el-gas-combustible-alternativo/>. Recuperado 10 de septiembre 2017

REYES, Edwin. Producción de biogás a partir de biomasa. Laboratorio de energías renovables de la Facultad Regional Multidisciplinaria (Farem – Estelí). 2016.

RIVAS, Olga. VARGAS, Margie. GUILLEN, Rossy. Biodigestores: Factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnología en marcha. 2010

SILVA, Juan Pablo. Tecnología del Biogás. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Pg. 19

SPINELLI, Monica. Efluentes. Disponible en: <https://goo.gl/z5raev>.

VIDA GAS. Lista de precios. [En línea]. <http://www.vidagas.co/secciones-142-s/listas-de-precios.htm>. Recuperado 22 de noviembre de 2017.

ZUÑIGA, Iván. Biodigestores .Tipos de Biodigestores. Monografía para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Hidalgo. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo 2007.Pg 20-26

ZUÑIGA, Ivan.Biodigestores.Tipos de biodigestores.Monografia para optar por el título de ingeniero mecanico.Hidalgo.Universidad Autónoma de estado de Hidalgo 2007.69 p.

ANEXOS

ANEXO A.

METODOLOGÍA PRUEBA CROMATOGRAFÍA DE GASES

1. MÉTODO DE ENSAYO

Preparación de las muestras	Ninguna
Normas o especificación aplicable	Ninguna
Desviación adiciones ó exclusiones de la norma o especificación	Ninguna

2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra No.	Descripción	Observaciones iniciales
063A	Biodigestor 1	Ninguna
063B	Biodigestor 2	Ninguna

NOTA: Los resultados presentados a continuación corresponden a las muestras entregadas al laboratorio por el cliente.

3. DATOS DEL ENSAYO

Equipo	Cromatógrafo Hp 5890
Detector	TCD. Temperatura 150 °C
Inyector	Temperatura 100°C
Columna	Malla molecular 13x
Tamaño de Muestra	0,1 ml

Carrera 30 No. 45-03, LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, Edificio 412, Oficina 212
Teléfono: (57-1) 316 5672 Fax: 316 5617 Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 14301 Fax: 14302
Correo electrónico: labiq_fiqbog@unal.edu.co
Bogotá, Colombia, Sur América

ANEXO B.

RESULTADOS CROMATOGRAFÍA DE GASES

4. RESULTADOS

	%vol. Metano			Promedio
LIQ063A	45	50,2	41,2	45,5
LIQ063B	51,9	56,7	48,1	52,2

	%vol. Hidrógeno			Promedio
LIQ063A	n.d	n.d	n.d	n.d
LIQ063B	n.d	n.d	n.d	n.d

n.d No detectado, por debajo del límite de detección (<0,5% v/v)

ORIGINAL FIRMADO

ING. JORGE ORLANDO MANRIQUE PERDOMO.
Coordinador
Laboratorio de Ingeniería Química

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Yo Paula Andrea Gutiérrez Tamayo, Claudia Carolina Rodríguez Torres, en calidad de titulares de la obra Propuesta de mejora del proceso de producción de biogás en Jerusalén Cundinamarca, elaborada en el año 2017, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autor es autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

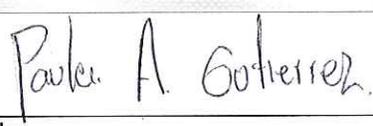
(AUTORIZAMOS)	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en de Bogotá, a los 5 días del mes de febrero del año 2018.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Paula Andrea	Gutiérrez Tamayo
Documento de identificación No	Firma
1.020.795.148	
Nombres	Apellidos
Claudia Carolina	Rodríguez Torres
Documento de identificación No	Firma
1.031.159.505	