EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA DEL USO DE UN BIORREACTOR ANAEROBIO PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN CAMPO RUBIALES COMO MODELO DE ESTANDARIZACIÓN

IVAN FABRICIO APONTE DIAZ
JUAN SEBASTIAN VELEZ CONTRERAS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C.
2019

EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA DEL USO DE UN BIORREACTOR ANAEROBIO PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN CAMPO RUBIALES COMO MODELO DE ESTANDARIZACIÓN

IVAN FABRICIO APONTE DIAZ
JUAN SEBASTIAN VELEZ CONTRERAS

Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
Benjamín Alexis Garavito Linares
Ingeniero de Petróleos

Co-director
Mario Alejandro Castro Piñeros
Ingeniero Ambiental

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota De Aceptación

_____
_____
_____
_____
_____
_____

_____
Angie Tatiana Ortega

_____
Nelson Fernández

Bogotá, D.C. Mayo de 2019.

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

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de ingeniería de petróleos

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

Las directivas de la Fundación 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.

A mi familia, quienes con su apoyo, amor y dedicación son el motor para superarme día.

Ivan F. Aponte Díaz

Dedico con cariño este proyecto a mis padres quienes con su apoyo incondicional me ayudan siempre a cumplir mis metas.

Juan S. Velez Contreras

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por permitirme culminar este proyecto, a mi familia por incentivarme a ser mejor persona día a día, dedico este título a mis padres que me dieron la vida, educación, y sobre todo sus consejos. Mi mama por su ejemplo de superación, fortaleza y dedicación, a mi papa por el apoyo, consejos y motivación a lo largo de mi carrera y de mi vida, a mi hermana Tatiana, por su respaldo y admiración y a Daniela quien con su conocimiento, amor, apoyo y compresión me ayudan a ser mejor persona. A todas y cada una de las personas que han hecho parte de este proceso y que me han acompañado en cada fase de mi vida, a todos aquellos que han visto mi esfuerzo para culminar de la mejor manera este escalón para lograr una de las metas más importantes en mi vida.

Ivan Fabricio Aponte Diaz

AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este gran logro en mi vida a mi madre y mi padre que me han brindado su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida y me enseñan hacer una persona íntegra. También agradezco a mis compañeros que compartieron todo tipo de experiencias durante mi periodo de estudio, y por ultimo quiero agradecer a Dios.

Juan Sebastian Velez contreras.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN 24

OBJETIVOS 25

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 26
1.1 TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN CAMPO RUBIALES – BIOTECH AMBIENTAL S.A.S 26
1.2 CAMPO RUBIALES 27
1.2.1 Historia del campo 27
1.2.2 Localización 28
1.3 RESIDUOS GENERADOS POR LA INDUSTRIA 29
1.3.1 Residuos peligrosos 30
1.3.2 Residuos no peligrosos 30
1.4 TRATAMIENTOS REALIZADOS A RESIDUOS ORGÁNICOS 31
1.4.1 Procesos físicos 32
1.4.2 Procesos fisicoquímicos 33
1.4.3 Procesos termoquímicos 34
1.4.4 Procesos biológicos o bioquímicos 35
1.5 BIODIGESTORES 40
1.5.1 Tipos de biodigestores 41
1.6 ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA 43
1.6.1 Bacterias hidrolíticas y fermentativas 44
1.6.2 Bacterias acetogénicas 44
1.6.3 Bacterias metanogénicas 45

2. CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO 47
2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS 48
2.2 EVALUACIÓN FISICOQUÍMICA DEL RESIDUO 49
2.2.1 Determinación del pH y temperatura inicial 49
2.2.2 Determinación de densidad 52
2.2.3 Análisis de humedad 54
2.2.4 Determinación de materia orgánica 56
2.2.5 Demanda química de oxígeno (DQO) 59
2.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN 62

3. VARIABLES DE PROCESO EN LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS 64
3.1 BIOMASA 64

3.1.1 Tipos de biomasa. 64
3.2 VARIABLES INFLUYENTES EN LA OPERACIÓN DEL BIOREACTOR 64
3.2.1 Temperatura 66
3.2.2 Humedad 66
3.2.3 Macronutrientes y micronutrientes 67
3.2.4 Tiempo de retención o velocidad de carga orgánica 67
3.2.5 Tipo de sustrato 67
3.2.6 Inhibidores (inhibición y toxicidad) 67
3.2.7 Biogás 68
3.2.8 pH 68
3.2.9 Demanda química de oxigeno (DQO) 68
3.2.10 Solidos volátiles 68
3.2.11 Relación inoculo-sustrato (I/S) 68
3.2.12 Relación carbono-nitrógeno (C/N) 68
3.2.13 Velocidad de reacción 69
3.3 SELECCIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN 70
3.3.1 Variables de operación 70
3.3.2 Variables dependientes 70
3.3.3 Parámetros de operación 71

4. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DE UN BIORREACTOR A ESCALA LABORATORIO 73
4.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE 73
4.1.1 Tolva de alimentación 73
4.1.2 Material de la cámara de digestión 74
4.1.3 Dimensiones de la cámara de digestión 74
4.1.4 Dimensiones del almacenamiento del biogás 75
4.1.5 Sistemas de conexión 76
4.2 PUESTA EN MARCHA DEL BIORREACTOR 77
4.2.1 pH 77
4.2.2 Temperatura 78

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGAS 80
5.1 DETERMINACIÓN DQO DEL SUSTRATO FINAL 80
5.2 ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA DE GASES 81
5.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS 82
5.4 CAPACIDAD CALORÍFICA SEGÚN COMPOSICIÓN 84
5.5 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DEL BIOGÁS 86
5.5.1 Posibles usos del potencial de generación de energía del biogás 86
5.6 MATRIZ DE EVALUACIÓN DE FACTORES INTERNOS DEL MONTAJE DE UN BIORREACTOR EN UN CAMPO PETROLERO 88

6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO 90
6.1 FACTORES A TENER EN CUENTA PARA LOGRAR EL OBJETIVO FINACIERO 90
6.1.1 Tarifas y costos energéticos 90
6.1.2 Disponibilidad del sustrato y contratos asociados 90
6.1.3 Eficiencia de la conversión energética 90
6.1.4 Ingresos extras por tratamiento de desecho a tercero y venta de abono 90
6.1.5 Impacto ambiental 90
6.1.6 Financiamiento, subsidios y apoyo de gobierno local 91
6.2 COSTOS INVERSION (CAPEX) 92
6.3 COSTOS OPERACIONALES (OPEX) 93
6.4 EVALUACION ECONOMICA 95
6.4.1 Flujo de caja 95
6.4.2 Valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno u oportunidad (TIR o TIO) 95

7. CONCLUSIONES 96

8. RECOMENDACIONES 98

BIBLIOGRAFÍA 99

ANEXOS 106

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Localización geográfica Campo Rubiales 29
Figura 2. Tratamientos realizados a residuos orgánicos 32
Figura 3.Etapas de la digestión anaerobia 39
Figura 4. Biodigestor de domo flotante. 41
Figura 5. Biodigestor tipo balón. 42
Figura 6. Biodigestor tipo UASB 43
Figura 7. Mezcla de residuos orgánicos 47
Figura 8. Proceso de toma de pH y temperatura 50
Figura 9. Proceso determinación de densidad 52
Figura 10. Proceso de determinación de materia orgánica 57
Figura 11. Determinación de DQO por método colorimétrico 59
Figura 12. Tolva de alimentación 74
Figura 13. Cámara de digestión 2019 75
Figura 14. Bidón escogido como gasómetro 76
Figura 15. Manguera plástica con aislamiento amarillo 76
Figura 16. Montaje del biorreactor terminado 77
Figura 17. Determinación DQO al sustrato final 80
Figura 18. Conexión tolva de alimentación con cámara de digestión 118
Figura 19. Conexión cámara de digestión con gasómetro 119
Figura 20. Sellos herméticos 119
Figura 21. Montaje del biorreactor culminado 120

LISTA DE ECUACIONES

pág.

Ecuación 1. Determinación de densidad 52
Ecuación 2. Porcentaje de humedad 55
Ecuación 3. Porcentaje de cenizas 57
Ecuación 4. Porcentaje de materia orgánica 57
Ecuación 5. Ecuación de la recta para la curva de calibración 60
Ecuación 6. Ecuación para la determinación de DQO 61
Ecuación 7. Porcentaje de remoción de DQO 81
Ecuación 8. Producción diaria de biogás. 83
Ecuación 9 Poder calorífico del biogás 84
Ecuación 10 Potencial de generación de energía del biogás. 85

LISTA DE GRÁFICAS

pág.

Gráfica 1. Composición de los residuos generados en campo. 49
Gráfica 2. Variación de peso de las muestras para determinación del contenido de humedad 54
Gráfica 3. Curva de calibración DQO 60
Gráfica 4. Comportamiento del pH a través del tiempo 78
Gráfica 5. Comportamiento de la temperatura al interior de la cámara de digestión a través del tiempo 79
Gráfica 6. Relación directa entre la biomasa inicial y la producción de biogás 83

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Datos de generación de residuos 48
Tabla 2. Resultados de pH del residuo 50
Tabla 3. Comparación de pH 51
Tabla 4. Resultados de temperatura del residuo 51
Tabla 5. Resultados del contenido de humedad total 53
Tabla 6. Comparación de DQO 53
Tabla 7. Resultados del contenido de humedad total 55
Tabla 8. Comparación de humedades totales 56
Tabla 9. Resultados del contenido de materia orgánica 58
Tabla 10. Comparación de Materia orgánica 58
Tabla 11. Datos de absorbancia para la obtención de la curva de calibración DQO 60
Tabla 12. Resultados del contenido de DQO 61
Tabla 13. Comparación de DQO 62
Tabla 14. Resumen caracterización de la biomasa 62
Tabla 15. Parámetros de operación 72
Tabla 16. Diseño de experimentos 72
Tabla 17 Dimensión tolva de alimentación 73
Tabla 18 Dimensiones del bidón seleccionado 74
Tabla 19 Dimensiones del gasómetro seleccionado 75
Tabla 20. Resultados DQO del sustrato final 81
Tabla 21. Calidad del biogás obtenido 82
Tabla 22. Calidad del biogás obtenido 82
Tabla 23 Resultados calculo poder calorífico del biogás 85
Tabla 24 Consumo eléctrico equipos en un campo petrolero 87
Tabla 25. Costos biorreactor a escala industrial 93
Tabla 26. Resumen financiero 95

LISTA DE CUADROS

pág.

Cuadro 1. Clasificación de residuos no caracterizados como peligrosos 30
Cuadro 2. Ventajas y desventajas del uso de un biodigestor anaerobio 40
Cuadro 3. Resumen del catabolismo de los polímeros orgánicos 44
Cuadro 4. Resumen del catabolismo de los polímeros orgánicos 45
Cuadro 5. Sustratos convertibles a metano 46
Cuadro 6 Clasificación de residuos generados por fuente de generación 48
Cuadro 7. Tipos de biodigestor 65
Cuadro 8. Matriz de avaluación de factores internos 88
Cuadro 9. Propuesta 1 94
Cuadro 10. Propuesta 2 94

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Protocolo caracterización del residuo	107
Anexo B. Protocolo determinación de materia orgánica	111
Anexo C. Protocolo determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)	114
Anexo D. Procedimiento de construcción del biorreactor	118
Anexo E. Materiales e instrumentos para el montaje a escala laboratorio de un biorreactor	121
Anexo F. Protocolo proceso de biodigestión	122
Anexo G. Registros control de pH en el biodigestor	126
Anexo H. Registros control de temperatura interna del biodigestor	127
Anexo I. Muestra de cálculos evaluación DQO del sustrato final	128
Anexo J. Cromatografía de gases	130
Anexo K. Muestra de cálculos producción de Biogás	131
Anexo L. Flujo de caja proyectado a 21 años	134

ABREVIATURAS

$°API$	Grados *American Petroleum Institute.*
$°C$	Grados Celsius.
$ASTM$	American Society for Testing and Materials.
$BOPD$	Barriles de petróleo por dia.
$CAPEX$	Capital expenditure.
CH_4	Metano.
Cm	Centímetros.
CO	Monóxido de carbono.
CO_2	Dióxido de carbono.
DQO	Demanda química de oxigeno (mg O_2/L).
g	Gramos.
GTC	Guia técnica Colombiana.
H_2	Hidrogeno diatomico.
H_2O	Agua.
$IDEAM$	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
$Kcal$	Kilocalorías (4,1868 kilojulio KJ)
Kg	Kilogramos.
Km	Kilómetros.
KW	Kilowatts (1KJ/s)
KWh	Kilowatts-hora (1KJ/s) por hora
L	Litros
m^3	Metros cúbicos.
mg	Miligramos.
Min	Minutos.
NTC	Norma técnica Colombiana.
$OPEX$	Operational expenditures.
$PEAD - APM$	Polietileno de alta densidad y alto peso molecular
Ph	Potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones
ft	Pies (0.3048m)
T	Temperatura (°C)
t	Tiempo (horas, min)
TIR	Tasa interna de retorno
$UASB$	Upflow Anaerobic Sludge Blanket.
$UPME$	Unidad de planeación minero energética.

GLOSARIO

ABONO BIORGÁNICO LÍQUIDO ANAERÓBICO (BIOL): es un abono que se produce a través de fermentación anaeróbica, el cual, a través del biodigestor genera un proceso de descomposición. El BIOL cuenta con la característica de estar concentrado por extractos o productos de plantas, previniendo el ataque de plagas y enfermedades.

BACTERIA FACULTATIVA: son bacterias que pueden adaptarse para crecer y metabolizar tanto en presencia como en ausencia de oxígeno.[1]

BACTERIA ANAEROBIA: son microorganismos que son capaces de sobrevivir y multiplicarse en ambientes que no tienen oxígeno.

BIODEGRADABLE: sustancia que se descompone o desintegra con relativa rapidez en compuestos simples, principalmente ocasionado[2] por bacterias aerobias o por algunas formas de vida como: bacterias, hongos, gusanos e insectos[3]

BIODIGESTOR: sistema cerrado, consiste en la producción y transformación de materia orgánica (biomasa) donde se deposita en un contenedor para su fermentación.se hidrata con agua los residuos con agua, dejándolo el tiempo suficiente para que los microorganismos degraden esta materia orgánica, convirtiéndolo en gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.[4]

BIOGÁS: compuesto que se genera por medio de un proceso sencillo de producción de gas metano a través de la transformación de residuos orgánicos mediante una digestión anaeróbica. El gas que se obtiene, biogás, es inodoro y al hacer combustión no produce humo. [5]

BIOMASA: la biomasa hace referencia a la materia orgánica total presente en un determinado ecosistema. Es la fuente de energía de tipo renovable que está basada

---

[1] AGUAMARKET. Bacterias facultativas [en línea], [20 Noviembre 2018]. Disponible en Internet: https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=171&termino=Bacterias+facultativas.

[2] MEDLINEPLUS. Anaerobio [en línea], [20 Noviembre 2018]. Disponible en Internet https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002230.htm.

[3] Contreras Huertas, A. M. y León Velandia, M. S. (2017) Evaluación de la factibilidad técnica de la implementación de La inyección de biosurfactantes en el campo Yariguí Cantagallo de Ecopetrol S.A. mediante simulación numérica (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Retrieved from http://hdl.handle.net/20.500.11839/6331

[4] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Colombia apuesta por los biodigestores para generar biogás en las áreas rurales.[En línea] [revisado 02 de mayo de 2018].disponible en internet: http://www.upme.gov.co:81/sgic/?q=tags/biogas.

[5] Jimenez L.M. Medio ambiente y desarrollo alternativo. Madrid:Cofas.1989.p.187.

en la utilización energética de los biocombustibles que se producen a raíz de materias primas de tipo biomásico, considerando a estas como cualquier tipo de materia orgánica biológica.[6]

COMPOST: es un compuesto que puede ser usado bien sea como abono orgánico, el cual se refiere de buena calidad, o también como sustrato. Éste cuenta con un alto contenido de materia orgánica la cual debe estar parcialmente mineralizada y humificada. [7]

DBO (demanda biológica de oxígeno): oxígeno necesario para degradar totalmente la materia orgánica con ayuda de los microorganismos. La materia orgánica biodegradable que se encuentre en la muestra[8].

FASE ACIDOGÉNICA: el segundo proceso se transfiere líquido de la hidrólisis y se permite la acidificación del sustrato, produciendo los ácidos del sistema, se purga el tanque con bomba.[9]

FASE HIDROLÍTICA: la hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos.[10]

FASE METANOGÉNICA: tercer paso se transfiere el sustrato de la acidogénesis y se permite, en dos baches de proceso, el tiempo necesario con inoculación de bacterias estrictas anaerobias[11], Los microorganismos metanogénicos pueden ser Considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano.[12]

FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA RENOVABLE (FNCER): son aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la

---

[6] San Miguel, G y Gutiérrez F. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Madrid:Muldi-prensa,2015.p.03.

[7]Soto, J. G. Producción de abonos orgánicos de buena calidad. Bogotá: Produmedios,2006.p.06

[8]IMAGUA WATHER TECHNOLOGIES. DBO y DQO.[En línea] [revisado 02 de mayo de 2018].disponible en internet: http://www.imagua.es/pages/index/dbo-y-dqo.

[9] PRESENTACION DE NEGOCIO BIOTECH BEAC CAMPO RUBIALES. Ibit.diapositiva 7

[10] Ministerio de energía de Chile. MANUAL DE BIOGAS. . [En línea] [revisado 07 de Mayo de 2018]. http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf

[11] PRESENTACION DE NEGOCIO BIOTECH BEAC CAMPO RUBIALES. Ibit.diapositiva 7

[12] Ministerio de energía de Chile. MANUAL DE BIOGAS. . [En línea] [revisado 07 de Mayo de 2018]. http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf

biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares.[13]

MATERIA ORGÁNICA: hace referencia a un elemento el cual se compone en gran medida de muchos compuestos de carbono y su producción en gran parte se debe a la fotosíntesis que generan las plantas. [14]

SGI&C – FNCER (UPME): el Sistema de Gestión de Información y Conocimiento en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (SGIC - FNCER) es una iniciativa que busca compartir con todos aquellos interesados en las energías renovables. – unidad de planeación minero energética (ministerio de minas).[15]

.

[13] República de Colombia (minminas . UPME), invierta y gane con energía, guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. .[En línea] [revisado 02 de mayo de 2018].disponible en internet: http://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf

[14] SALAS, G. d. La materia orgánica del suelo.1979.p.04

[15] UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA, Colombia apuesta por los biodigestores para generar biogás en las áreas rurales.[En línea] [revisado 02 de mayo de 2018].disponible en internet: http://www.upme.gov.co:81/SGIC/?q=pagina/sobre-nosotros

RESUMEN

El biorreactor es una herramienta que permite tratar los residuos sólidos orgánicos con el fin de llegar a la obtención de energía renovable. A través del presente trabajo se realizó la evaluación técnica y financiera relacionada con la implementación de un biorreactor como modelo en el Campos Rubiales y con ello poder determinar la viabilidad de la réplica en otros campos.

Fue necesario realizar una caracterización de los residuos sólidos generados por el campo y con la determinación de los compuestos orgánicos aptos para el proceso de la biorreacción anaerobia. Así mismo a través de un análisis técnico se determinaron las variables que permiten describir las generalidades que deben tener un biorreactor y su biomasa.

Adicionalmente, se realizó un biorreactor a escala de laboratorio con el fin de simular todo el proceso de biodigestión y poder obtener biogás para su respectivo análisis. Las simulaciones fueron realizadas tres veces con el fin de poder determinar la calidad del gas y al mismo tiempo establecer el potencial eléctrico a suplir en Campo Rubiales.

Finalmente, se analizó la viabilidad de la implementación del biorreactor en el Campo Rubiales mediante una evaluación.

PALABRAS CLAVE: biorreactor, Campo Rubiales, biogás, biol, metano, biomasa, energía eléctrica, potencial eléctrico, residuos, costos, rentabilidad

INTRODUCCIÓN

Campo Rubiales es un campo petrolero ubicado en el departamento del Meta, Colombia; se caracteriza por ser el más grande a nivel nacional y debido a su operación genera un gran volumen de residuos. En el campo se generan residuos orgánicos a partir de las actividades de perforación, producción, refinación y las demás actividades humanas.

Actualmente el campo no realiza ningún tratamiento a este tipo de residuos y en su lugar se contratan empresas para su disposición final, esto genera costos adicionales y evita el aprovechamiento de todas las materias primas a disposición, sin embargo, existen herramientas que permiten obtener beneficios por el procesamiento de los residuos generando energía renovable a partir de todos los recursos disponibles, entre dichas herramientas podemos encontrar los biorreactores, estos son sistemas herméticamente cerrados en los cuales se procesan residuos orgánicos (para efectos del proceso llamados biomasa) generando energía renovable no convencional llamada biogás.

La ley 1715 del 2014 promueve la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional[16], con lo cual se busca la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar el abastecimiento energético provocando una disminución en el costo de este servicio, teniendo en cuenta lo anterior, la implementación de un biorreactor como generador de energía renovable no convencional cumpliría con dicha norma.

La implementación de un biorreactor se llevó a cabo en Campo Rubiales por la empresa Biotech ambiental S.A.S con el fin de darle tratamiento a los residuos orgánicos generados diariamente en el campo, sin embargo, dejo de operar en el año 2016 y no se realizó una cuantificación de los resultados obtenidos (cantidad y calidad del biogás); con el fin de dar respuesta a esta incógnita, la presente investigación busca analizar las características técnicas y financieras demostrando la viabilidad de la implementación de un biorreactor en un campo petrolero.

[16] CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1715 (13, Mayo, 2014) Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluación técnica y financiera del uso de un biorreactor anaerobio para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en campo rubiales como modelo de estandarización.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una caracterización de los residuos sólidos generados en el área de influencia para la separación y obtención de biomasa efectiva para el proceso de biorreacción anaerobia.

- Describir las generalidades de un biorreactor y la biomasa, mediante un análisis técnico de las variables del proceso.

- Realizar a escala de laboratorio un biorreactor para procesar biomasa de Campo Rubiales y obtener biogás.

- Analizar los diferentes resultados obtenidos de producción de biogás, usando tres tipos de bacterias en el proceso de biodigestión de biomasa generada en Campo Rubiales.

- Determinar el potencial energético del biogás para suplir necesidades de los campos petroleros, mediante el análisis de su capacidad calorífica y composición.

- Determinar la viabilidad de la implementación de un biorreactor en un campo petrolero mediante la creación de una matriz de selección basados en los parámetros de diseño y la mejor bacteria.

- Realizar el análisis financiero de la implementación de un biorreactor como fuente no convencional de energía.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se establecen los conceptos relacionados con el presente proyecto, abordando temas como los tipos de desechos y los tratamientos realizados a residuos orgánicos, destacando entre éstos métodos la digestión anaerobia, los tipos de biodigestores que se usan para éste proceso y los aspectos microbiológicos involucrados; esto con el propósito de dar una breve explicación acerca de los procesos que se llevaron a cabo durante la presente investigación.

1.1 TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN CAMPO RUBIALES – BIOTECH AMBIENTAL S.A.S

Biotech Ambiental S.A.S es una compañía colombiana especializada en biotecnología, sostenibilidad y medio ambiente, dedicados al diseño, implementación y soporte de biodigestores anaerobios, plantas de biogás, sistemas de procesamiento y aprovechamiento de residuos sólidos y plantas de tratamiento de aguas residuales e incineración controlada de residuos sólidos urbanos[17].

La empresa realizó la instalación de un sistema de biodigestión anaerobio en Campo Rubiales con capacidad de procesamiento de 5 toneladas diarias de residuos orgánicos donde a partir del proceso de biodegradación se generaban subproductos aprovechables (biogás y biol); las fases del proceso implementado son las siguientes:

- Tolva: estabilización y homogenización del material con adición de minerales y enzimas de inicio.
- Fase de Hidrólisis: inoculación de bacterias facultativas en los dos primeros tanques.
- Fase Acidogénica: se transfiere líquido por flujo ascendente de la hidrólisis y se permite la acidificación del sustrato.
- Fase Metanogénica: se transfiere el sustrato por flujo ascendente de la acidogénesis y se permite la formación de biogás.[18]

[17] CASTRO, Mario. Presentación comercial Biotech [En línea], 14 de Febrero de 2017 [Revisado 22 de Septiembre de 2018]. Disponible en internet: https://connectamericas.com/sites/default/files/company_files/PRESENTACI%C3%93N%20COMERCIAL%20BIOTECH%20V4%2014-02-2017.pdf

[18] CASTRO, Mario. Presentación de negocio Biotech beac Campo Rubiales: Presentación en Power Point. 2018

1.2 CAMPO RUBIALES

1.2.1 Historia del campo. Campo Rubiales fue descubierto por Intercol, compañía subsidiaria de Exxon en Colombia, en 1981, año en el cual se perforó el primer pozo (Rubiales-1) que alcanzó una profundidad de 3.100 pies y evidenció petróleo de 13,5 °API. A raíz de esto, en 1988 fueron suscritos los contratos de Participación de Riesgo Rubiales y de Asociación Pirirí entre Ecopetrol (Empresa Colombiana de Petróleos) y las compañías Tethys Petroleum, Tumsector y Astralstake Limited.[19]

Durante los años 1989 y 1994 se llevaron a cabo las siguientes cesiones de participación y cambios de nombre de los asociados:

Julio de 1989, se comunicó el cambio de nombre de la sociedad Astalstake Limited a Tuskar Colombia Limited y se designó a Tuskar como único operador.

Octubre de 1990, solicitud de autorización por parte de Tethys para ceder un 25% de su interés a la compañía Dyas. Ecopetrol comunica a Tethys que está de acuerdo con que se ceda el 10% del total de la participación.

Junio de 1991, se completaron los primeros tres (3) años de exploración y se dio participación en el contrato a la compañía Dyas.

Febrero de 1994, se comunicó el cambio de nombre de la operadora Tuskar a Coplex.

En 1995 se dio inicio a las primeras actividades de perforación, mientras que en marzo de 1996 Ecopetrol decidió no aceptar la comercialidad del Campo Rubiales. Por esta razón, el Ministerio de Minas declaró el inicio de la explotación de los contratos de Pirirí bajo la modalidad de "Solo Riesgo". Posteriormente, en agosto de 1997, el campo fue cerrado por problemas de orden público.

En enero del año 2000 se reinician operaciones en el campo y la compañía Dyas cambió su nombre a Rubiales Oil. Un año más tarde, en febrero, Tethys Petroleum fue designada como la compañía operadora del campo y en el año 2002 los grupos Elliot y Synergy entraron a participar en calidad de inversionistas. La primera campaña de perforación con 14 pozos verticales de desarrollo fue realizada en el año 2003 dando resultados exitosos, en diciembre del mismo año se dio la integración patrimonial de las empresas Turnsector - Astralstake - Coplex en la empresa Meta Petroleum Limited (filial de Pacific E&P), quien asumió la operación

[19] AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, «Cuena Llanos Orientales informacion Geologica y Geofisica.,» [En línea]. [revisado 10 Febrero 2017]. Disponible en internet: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5.%20Informe%20Final%20Llanos.pdf.

del campo con un 80% de participación, reemplazando a Tethys Petroleum a quien fue concedido el porcentaje restante.

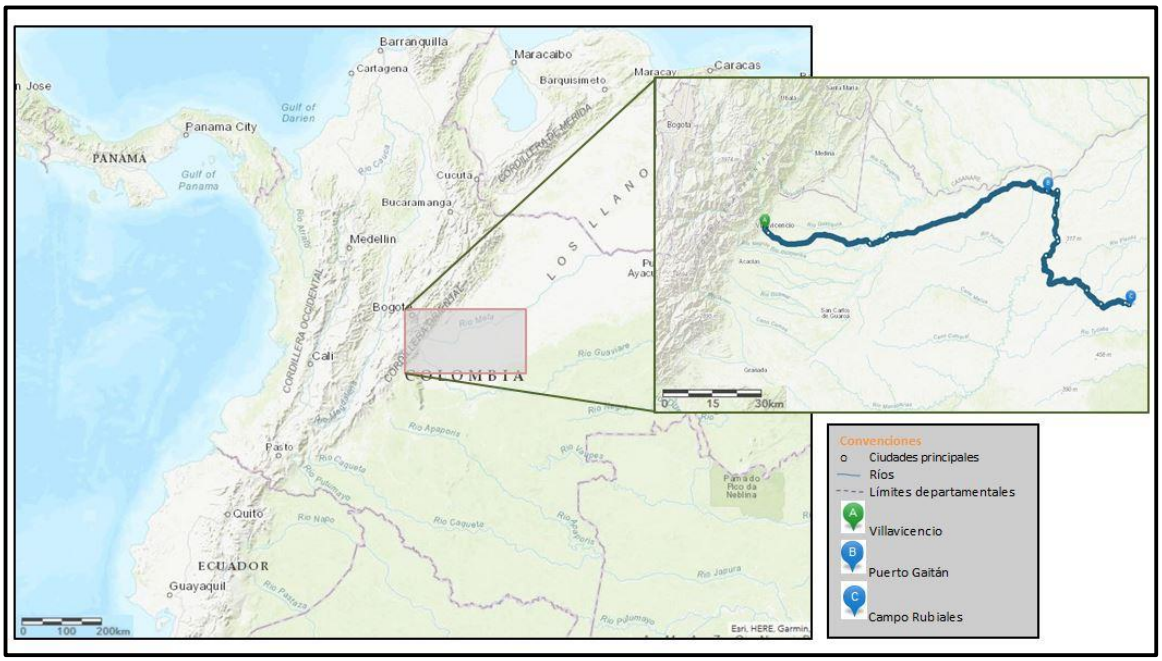
En noviembre del año 2004 Meta Petroleum Limited solicitó la extensión del contrato, petición rechazada por Ecopetrol. Durante el siguiente año se continuó con la segunda campaña de perforación de 15 pozos (tres horizontales, un monitor, un inyector, dos exploratorios, tres de avanzada y cinco en desarrollo). En el año 2006 Ecopetrol hizo uso del derecho contemplado en el contrato y tomó participación en la operación de Campo Rubiales, suspendiendo la modalidad de "Solo Riesgo", a comienzos del mismo año se cumplió el objetivo del Proyecto 12K o 12.000 BOPD y se dio inicio a la tercera campaña de perforación de pozos horizontales de desarrollo. En julio del año siguiente Petro Rubiales Energy adquirió la participación del grupo Elliot y parte de la participación del grupo Synergy. En el mismo año se logró el objetivo de los 17K (17.000 BOPD).

En el año 2008 fue aprobado el Plan de Desarrollo 30K y posteriormente el Plan de Desarrollo 50K, además la fusión de Petro Rubiales Energy con Pacific Stratus Energy dio origen a Pacific Rubiales Energy Corporation, matriz de Meta Petroleum, Quifa Petroleum y Tethys Petroleum. En el año 2009 fue aprobado el Plan de Desarrollo 100K, seguido de los Planes de Desarrollo 140K y 170K (2010), 180K y 193K (2011) y 210K (2012). En el año 2013 se alcanzó el récord de producción de 212115 BOPD y Pacific Rubiales adquirió el 100% de los derechos de la Asociada. En el año 2016 se revirtió el contrato de asociación y en julio de este año Ecopetrol asumió la operación de Campo Rubiales.[20]

1.2.2 Localización. Campo Rubiales forma parte de los campos petroleros situados sobre la cuenca de los Llanos Orientales y se encuentra ubicado al Oriente del departamento del Meta, a 167 km al sureste del municipio de Puerto Gaitán y a 465 km de Bogotá. La temperatura promedio es de 32,3 °C, precipitaciones de 1.900 a 22.000 mm/año. En la Figura 1 se muestra la localización geográfica junto con la ruta de acceso terrestre al campo, tomando como punto de partida la ciudad de Villavicencio.

[20] AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, «Cuenca Llanos Orientales. Estudio integrado - crudos pesados.,» [En línea]. [revisado 10 febrero 2017]. disponible: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Potencial%20de%20hidrocarburos%20en%20Colombia,%20Prof.%20Carlos%20A.%20Vargas%20(PDF).pdf.

Figura 1. Localización geográfica Campo Rubiales



Fuente: ArcGIS for Desktop. ESRI Inc. Disponible en ESRIInc. Página web de ESRI, elaboración propia.

1.3 RESIDUOS GENERADOS POR LA INDUSTRIA

La generación de residuos es un hecho inherente a la actividad industrial, según Chalco[21], la industria petrolera reconoce que por cada pozo vertical que se perfora se generan 500 m^3 de sólidos y entre 2500 a 3000 m^3 de residuos líquidos y a su vez, cada pozo direccional genera entre 20 y 30 % más de residuos sólidos y líquidos, estos residuos se clasifican principalmente entre residuos peligrosos y no peligrosos, a continuación, se muestra una breve descripción de cada una de estas:

[21] CHALCO, Liliana. Propuesta para la gestión de los residuos generados en las plataformas de perforación de petróleo, caso de estudio: Plataforma CCDC-38 Cantón lago agrio, Provincia de sucumbíos. Tesis de Grado Quito, Perú.: Escuela politécnica nacional. 2015. p. 6.

1.3.1 Residuos peligrosos. En Colombia, los residuos sólidos de carácter peligroso están reglamentados por el Decreto 4741 de 2005[22], en él, se indica que un residuo peligroso es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente; según el Informe nacional de residuos o desechos peligrosos desarrollado por el IDEAM, la extracción de petróleo crudo y las actividades de apoyo para la extracción de petróleo y gas generan 107.125 toneladas de residuos peligrosos al año, esto corresponde a un 36% del total generado en Colombia[23].

1.3.2 Residuos no peligrosos. Los residuos no peligrosos hacen referencia a aquellos residuos que por su naturaleza y composición no tienen efectos nocivos sobre la salud de las personas o los recursos naturales, y no deterioran la calidad del medio ambiente[24], en este tipo de residuos se encuentran residuos domésticos (generados principalmente debido a las condiciones de alojamiento y alimentación de los trabajadores[25]) como industriales, a continuación, en el Cuadro 1, se muestran los residuos que son catalogados como no peligrosos

Cuadro 1. Clasificación de residuos no caracterizados como peligrosos.

TIPO DE RESIDUO
Residuos domésticos inorgánicos
Residuos domésticos orgánicos
Residuos de vidrio
Agua de formación
Sedimentos de perforación y fondos contaminados del almacenamiento o depósito de desperdicios no peligrosos

[22] COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741 Op. Cit.
[23] IDEAM, Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia, 2016. Bogotá, D.C., 2016. p. 49.
[24] CALAO, Jorge. Caracterización ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías disponibles para la prevención y mitigación de impactos ambientales. Tesis de Grado Medellín, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2007. p. 32.
[25] CEBALLOS, Lorena; MERA, Juan Pablo. Elaboración del Plan de Manejo Ambiental de residuos sólidos durante la etapa de construcción de la Refinería del Pacífico Eloy Alfaro, sector El Aromo, provincia de Manabí. Tesis de Maestría Sangolqui, Ecuador.: Escuela superior politécnica del ejército. 2012. p. 134.

Cuadro 1. Clasificación de residuos no caracterizados como peligrosos. (Continuación)

TIPO DE RESIDUO
Residuos de petróleo crudo
Tierra con hidrocarburos
Lodos y arena contaminados con hidrocarburos
Hidrocarburos recuperados en el flujo de producción y/o tratamiento de efluentes
Residuos de plástico
Residuos de papel, cartón y productos de papel
Residuos textiles
Otros residuos inorgánicos industriales no clasificados como peligrosos

Fuente: CEBALLOS, Lorena; MERA, Juan Pablo. Elaboración del Plan de Manejo Ambiental de residuos sólidos durante la etapa de construcción de la Refinería del Pacífico Eloy Alfaro, sector El Aromo, provincia de Manabí. Tesis de Maestría Sangolqui, Ecuador.: Escuela superior politécnica del ejército. 2012. p. 40. Modificado por los autores.

El presente trabajo se enfoca en el tratamiento de los residuos no peligrosos, más específicamente los residuos orgánicos.

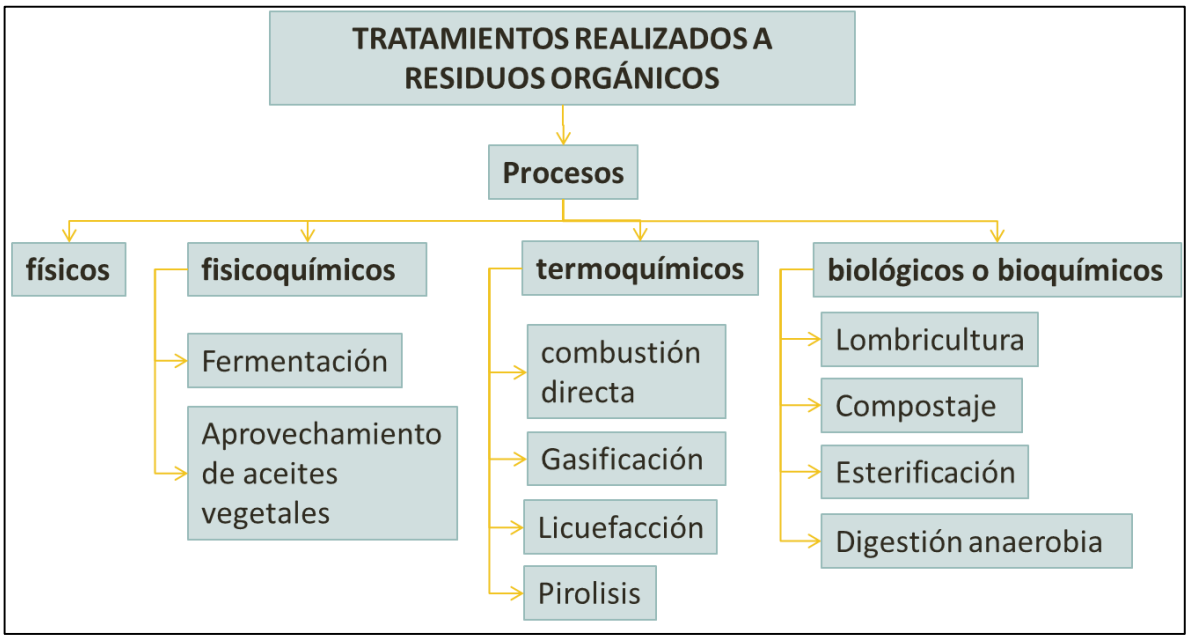
1.4 TRATAMIENTOS REALIZADOS A RESIDUOS ORGÁNICOS

Teniendo en cuenta que la biomasa es un recurso que se presenta en una variedad de materiales: madera, aserrín, paja, restos de semillas, estiércol, residuos de papel, residuos domésticos, aguas residuales, etc., algunos materiales puedan utilizarse directamente como combustibles y otros requieren tratamientos previos para ser aprovechados. [26]

[26] CALERO, Roque., CARTA, José A. y PADRÓN, José M., Tecnologías energéticas específicas. Capítulo 18: Energía de la biomasa y de los recursos sólidos, [En línea] [Revisado AGOSTO 22 DEL 2018]. Disponible en internet: https://docplayer.es/12647323-Energia-de-la-biomasa-y-de-18-los-residuos-solidos.html. p. 427

Para aprovechar o reutilizar este tipo de residuos existen técnicas tan simples como la combustión directa, hasta técnicas mucho más complejas como la esterificación; según la Guía Técnica Colombiana GTC 53-7[27] estas técnicas se encuentran clasificadas dependiendo del tipo de proceso al que son sometidas; a continuación, en la Figura 2 se muestra un resumen de los diferentes tratamientos realizados a residuos orgánicos los cuales son descritos en el presente capítulo.

Figura 2. Tratamientos realizados a residuos orgánicos



Fuente: elaboración propia

1.4.1 Procesos físicos. Los procesos físicos son procesos donde la composición de la materia en estudio no cambia, son procesos reversibles y donde no ocurren cambios de energía.

[27] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Bogotá D.C., Colombia. 26 de abril de 2006.

1.4.1.1 Materias primas para alimentación animal. En algunos sectores del país, principalmente en las zonas rurales, los pobladores separan la fracción orgánica generada en el inmueble (vegetales y alimentos preparados) para la alimentación de animales, en su mayoría ganado porcino.[28,29]

Los tratamientos requeridos para la transformación del residuo en materias primas para alimentación animal dependen principalmente de las características del mismo, por ejemplo, para el caso de los residuos de origen animal, el tratamiento es más complejo y especializado pues estos se convierten en harina o grasa por medio de un procesamiento seco, por otro lado, los residuos de origen vegetal se transforman por medio de un tratamiento más sencillo como el secado o la molienda y se incorporan en la formulación de alimentos para animales.[30]

1.4.2 Procesos fisicoquímicos. Los métodos fisicoquímicos son procesos de elevados costos de inversión, por esta razón, únicamente son considerados proyectos viables para grandes industrias generadoras de residuos como caña de azúcar, madera, semillas e incluso aceites usados31, sin embargo, a continuación se mencionan des métodos sados para el tratamiento de los mismos.

1.4.2.1 Fermentación. Este método de aprovechamiento consiste en convertir la biomasa rica en carbohidratos (azúcares, almidón y celulosa) en alcohol etílico por medio de la acción de fermentos que reaccionan en presencia de aire[32].

En general, el proceso consiste en cuatro etapas: dilución, conversión, fermentación y destilación o deshidratación[33] y el producto final consiste en un líquido con porcentajes de alcohol del 5% al 15% dependiendo del método y las condiciones de fermentación; este líquido se utiliza principalmente como sustituto de la gasolina, bien sea como único combustible o en mezcla, sin embargo, el empleo de bioetanol como único combustible debe realizarse en motores específicamente diseñados para el biocombustible.[34]

---

[28] JARAMILLO HENAO, Gladys y ZAPATA MÁRQUEZ, Liliana María. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Tesis. Universidad de Antioquia. 2008. p. 35
[29] PINTO GOMEZ, Lina Paola y SUAREZ CUCHIMAQUE, Maidy Janeth. Propuesta para el manejo de residuos orgánicos producidos en la plaza de mercado de Chía (Cundinamarca). Tesis. Universidad distrital Francisco José de Caldas. 2016. p. 22
[30] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Op. Cit. p. 18 - 19
[31] PINTO. Op. Cit. p. 27
[32] Ibid., p. 16
[33] PINTO. Op. Cit. p. 26
[34] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Op. Cit. p. 16

1.4.2.2 Aprovechamiento de aceites vegetales. Los aceites usados pueden aprovecharse en la obtención de un combustible que puede llegar a reducir el uso del aceite combustible para motores llamado biodiesel, el desarrollo de estas técnicas de aprovechamiento aún se encuentra en fase experimental en Colombia[35], sin embargo, la técnica más estudiada es la Transesterificación.[36]

Los aceites vegetales están constituidos por moléculas de triglicéridos que se encuentran conectadas a la glicerina a través de enlaces de ésteres, en el proceso, se sustituye la glicerina por metanol que se añade al proceso, obteniéndose moléculas lineales parecidas a las de los hidrocarburos presentes en el diesel.[37]

1.4.3 Procesos termoquímicos.

1.4.3.1 Proceso de combustión directa. La combustión directa es la técnica más antigua para obtener energía a partir de la biomasa, durante este proceso, los residuos orgánicos son quemados en una caldera en presencia de oxígeno con el fin de obtener vapor[38]; durante este proceso la materia orgánica (combustible) reacciona químicamente con el oxígeno produciendo una reacción exotérmica, obteniéndose principalmente dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), sin embargo, si los elementos azufre y nitrógeno forman parte de los reactivos también se producirá óxidos de azufre (SOx) y nitrógeno (NxO_2). [39]

La combustión de la materia orgánica se ve principalmente afectada por la composición de la misma, la cantidad de oxígeno disponible y la temperatura a la cual se efectúa la combustión (entre 600 °C y 1300 °C), de esta manera, se produce la transformación de la energía química almacenada en la biomasa, en energía calórica. El calor generado, puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica y/o calefacción.[40]

1.4.3.2 Gasificación. En el proceso de gasificación la biomasa es oxidada parcialmente en ausencia parcial de oxígeno para producir un combustible gaseoso que contiene CO, CO_2, H_2, CH_4 y vapor de agua, la proporción de cada uno de estos en el combustible depende principalmente de las características iniciales de la biomasa y las condiciones de operación del gasificador.[41]

---

[35] Ibid., p. 17
[36] PINTO. Op. Cit. p. 26
[37] CALERO. Op. Cit. p. 442
[38] PINTO. Op. Cit. p. 27
[39] CALERO. Op. Cit. p. 429
[40] Ibid., p. 430
[41] Ibid., p. 432

Durante los procesos de gasificación la temperatura no debe ser inferior a 700 °C para obtener un producto que ofrezca un buen rendimiento, sin embargo, la temperatura tampoco debe superar los 1500 °C pues esto produciría problemas técnicos con los equipos usados en el proceso, adicionalmente, los residuos implementados en procesos de gasificación deben contener un porcentaje de humedad muy bajo, pues de otra manera, parte de la energía proporcionada al proceso se perdería en la evaporación de dicha humedad.[42]

1.4.3.3 Licuefacción. El proceso de licuefacción consiste en transformar biomasa con alto contenido de carbono en combustible líquido (mezcla de hidrocarburos líquidos). El producto final debe ser utilizado de manera eficiente, para que se considere una técnica que no sólo permita reducir el nivel de desechos sólidos orgánicos, sino también de aprovechamiento de la misma.[43]

1.4.3.4 Pirolisis. La pirolisis en un proceso realizado en ausencia de oxígeno mediante el cual se procesa un combustible para obtener otro mejor, la materia es sometida a altas temperaturas para de esta manera poder obtener combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser empleados al igual que las técnicas anteriores, para la generación de energía eléctrica.[44]

La biomasa empleada y las condiciones de operación del proceso son los factores que determinan la composición y tipo de producto obtenido. Los productos obtenidos pueden ser carbón vegetal, combustibles líquidos y combustible gas[45]

1.4.4 Procesos biológicos o bioquímicos. En los procesos biológicos la biomasa húmeda se degrada debido a la acción de los microorganismos que contiene la biomasa o que se añaden al proceso para aumentar su efectividad, el producto de estos procesos generalmente posee una alta densidad energética.[46]

1.4.4.1 Lombricultura. El término lombricultura hace referencia a la crianza intensiva en cautiverio de lombrices de tierra principalmente de la especie Roja Californiana (*Eisenia foetida*), las mismas se alimentan de residuos orgánicos en descomposición y gracias a su digestión ayudan a la fertilización del suelo obteniendo un producto primario denominado “vermicompuesto” el cual es rico en nutrientes para toda clase de cultivos.[47,48]

---

[42] Ibid. p. 433
[43] PINTO. Op. Cit. p. 28
[44] Ibid. p. 28
[45] CALERO. Op. Cit. p. 436
[46] Ibid. p. 437
[47] PINTO. Op. Cit. p. 22
[48] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Op. Cit. p. 8

El proceso consta de las siguientes cuatro etapas:

- **Acondicionamiento:** se realiza el acopio de los residuos orgánicos en un lugar apropiado teniendo en cuenta que su altura no exceda los 40cm y que posea un buen sistema de drenaje, adicionalmente, se deben efectuar procesos de desintoxicación y estabilización del residuo.
- **Riego y adición de residuos:** una vez se han depositado las lombrices y la biomasa en los lechos, estos deben ser regados dos veces a la semana para garantizar las condiciones de humedad y temperatura que simulen el hábitat de las lombrices.
- **Periodo de humidificación:** la obtención del vermicompuesto se logra en seis meses, sin embargo, a partir de los tres meses se pueden empezar a efectuar cultivos de toda clase sobre los desechos orgánicos en proceso de humidificación.
- **Cosecha de lombrices y abono:** teniendo en cuenta que las lombrices pueden duplicar su población en un periodo de tres meses es posible ampliar los lechos al finalizar el proceso de lombricultivo, sin embargo, es necesario retirar las lombrices y eliminar el riego de los lechos, luego de esto, se procede finalmente a retirar el vermicompuesto en su estado natural.[49]

A partir de esta técnica no sólo se logra disminuir los desechos orgánicos y generaron acondicionador de suelos, sino además se puede producir carne y harina de lombriz con aplicaciones en la alimentación humana y de otros animales como peces, aves y cerdos, entre otros; sin embargo, se deben mantener ciertas condiciones de humedad, temperatura, pH y alimentación que permitan la supervivencia de la especie, su reproducción, fecundidad, etc.[50]

1.4.4.2 Compostaje. El compostaje es un proceso natural y bioxidativo mediante el cual se degrada dióxido de carbono para formar agua, minerales, como y una materia orgánica estable, libre de patógenos y disponible para ser utilizada en la agricultura como abono acondicionador de suelos sin que cause fenómenos adversos. [51]

El proceso se puede dar en forma aerobia, anaerobia o ambas (generalmente aerobia) y en él se usa materia orgánica como estiércol, residuos animales. Virutas de madera, residuos vegetales y residuo de comida, los cuales sirven como fuente de nutrientes para el crecimiento microbiano.[52] Y consta de las siguientes siete etapas:

---

[49] Ibid. p. 9
[50] PINTO. Op. Cit. p. 23
[51] ARROYAVE S., M.; VAHOS M., D. Evaluación del proceso de compostaje producido en un tanque biorreactor piloto por medio de bioaumentación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1999.
[52] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Op. Cit. p. 10

- **Preparación o acondicionamiento de materias primas:** se deben retirar las impurezas que pueda contener la materia prima garantizando que la relación carbono-nitrógeno final de la mezcla se encuentre entre 25-30 con un humedad entre 40% y 60%, adicionalmente se debe reducir el tamaño de partícula para aumentar el área superficial de las mismas que entrará en contacto con los microorganismos.
- **Descomposición:** la pila pasa a través de varias etapas de calentamiento debido a que cuando el material se encuentra a temperatura ambiente, los microorganismos se multiplican rápidamente y se eleva la temperatura hasta alcanzar la temperatura máxima (60 °C), en este momento se han descompuesto los materiales más fácilmente biodegradables y se ha satisfecho la mayor parte del alto nivel de Demanda Biológica de Oxígeno.
- **Enfriamiento:** al llegar a esta etapa del proceso el material ya no atrae moscas y gusanos ni tampoco debe producir malos olores, los compuestos menos reactivos se descomponen en carbohidratos simples los cuales quedan a disposición de los microorganismos. Al finalizar el enfriamiento, la mayor parte de los nutrientes se han consumido y se presenta una competencia entre los microorganismos, liberándose compuestos antibióticos.
- **Maduración:** al llegar a esta etapa la actividad biológica disminuye puesto que ya ha sido degradada la mayor parte de la materia orgánica, sin embargo, el volteo de la pila antes del proceso de maduración ocasiona un aumento en la temperatura y en consecuencia, el ataque de los microorganismos sobre los compuestos de difícil descomposición. Es importante tener en cuenta que el tiempo que el proceso tarde en llegar a la etapa depende de la naturaleza del material orgánico, de las condiciones de humedad y aireación y de las condiciones de su entorno.
- **Procesamiento o acabado:** en esta etapa se adecua el producto final para su posterior uso y comercialización, esto incluye un proceso de tamizado que ayuda a mejorar la uniformidad y apariencia del *compost*.
- **Almacenamiento**
- **Comercialización**

Para favorecer una buena oxigenación se debe manejar un volteo frecuente, tamaño de partícula adecuada, mezclar en la receta materiales que permitan una buena oxigenación, y manejo adecuado del agua. La frecuencia de volteo debe estar determinada por la presencia de oxígeno. Para esto se han diseñado equipos que miden la presencia de oxigeno directamente al interior de la pila de compost, o en su defecto la presencia de CO_2.[53]

[53] JARAMILLO. Op. Cit. p. 40

1.4.4.3 Esterificación. Este proceso es utilizado para obtención de biodiesel utilizando los aceites de semillas oleaginosas, las cuales, después de un proceso de extracción y refinado, se someten a un proceso químico con el propósito de obtener éster metílico. En el proceso se sustituye la glicerina por metanol (alcohol metílico) que se añade al proceso, obteniéndose moléculas lineales parecidas a los hidrocarburos presentes en el diésel.

1.4.4.4 Digestión anaerobia. La digestión anaerobia como su nombre lo indica, se lleva a cabo en ausencia de aire, en este caso, la descomposición de la biomasa se debe a la acción de bacterias y el producto resultante es un biogás, con metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además del efluente que pueden emplearse como fertilizante orgánico.[54]

El proceso de digestión anaerobia involucra poblaciones de microorganismos encargados en la descomposición de la materia orgánica, este proceso se lleva a cabo en un tanque séptico en ausencia de oxígeno debido a que los microrganismos productores de metano no sobreviven en ambientes con oxígeno y luz[55]; las tres etapas fundamentales en las que se realiza el proceso se describen a continuación:

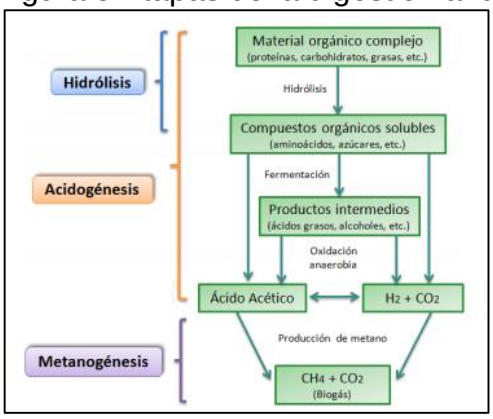
- **Etapa sólida o hidrolisis:** en esta etapa las sustancias como los carbohidratos, lípidos y proteínas (presentes en la materia orgánica) son atacadas por bacterias fermentativas, las cuales se encargan de la producción de ácidos grasos, glucosa y aminoácidos.[56] Esta etapa consta de dos fases: la solubilización del material particulado insoluble y la descomposición de polímeros orgánicos a cadenas más pequeñas como monómeros o dímeros.[57]
- **Etapa líquida o acetogénica:** en esta etapa, se da la transformación de los azucares en ácidos orgánicos, es decir, los azúcares producidos en la etapa sólida son atacadas por bacterias propiónicas, bacterias acidogénicas y bacterias acetogénicas, formando ácidos orgánicos.[58]
- **Etapa gaseosa o metanogénica:** en esta etapa, las bacterias metanogénicas se alimentan de los ácidos orgánicos para producir principalmente metano CH_4 y gases ácidos como dióxido de carbono CO_2 y SH_2. Es la más importante debido a que las bacterias metanogénicas requieren de condiciones controladas de temperatura y se inhiben fácilmente[59].

---

[54] CALERO. Op. Cit. p. 437
[55] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Op. Cit. p. 11
[56] RODRIGUEZ MIRANDA, Nelson Andrés. Estudio de factibilidad técnica y financiera de utilización de biomasa para suplir necesidades energéticas en el edificio de bienestar universitario. Tesis. Universidad industrial de Santander. 2010. p. 18
[57] LOPEZ VEGA, Erick Emmanuel y RUIZ DELGADO, Mario Fernando. Celdas de combustible a partir de biogás: caracterización del proceso de generación eléctrica en el sector rural con IDEF0. Tesis. Universidad industrial de Santander. 2008. p. 40
[58] RODRIGUEZ. Op. Cit. p. 19
[59] Ibid. p. 20

A continuación, en la Figura 3, se muestra un resumen de las tres etapas descritas anteriormente.

Figura 3.Etapas de la digestión anaerobia



Fuente: LOPEZ VEGA, Erick Emmanuel y RUIZ DELGADO, Mario Fernando. Celdas de combustible a partir de biogás: caracterización del proceso de generación eléctrica en el sector rural con IDEF0. Tesis. Universidad industrial de Santander. 2008. p 41. Modificada por los autores.

La composición del biogás puede variar principalmente de la composición de la biomasa usada en el proceso y del tipo de tecnología utilizada, sin embargo, el componente principal siempre es el metano; a continuación, se muestra una composición típica del biogás:

- 50- 85% en volumen de metano CH_4.
- 14% - 49% en volumen de anhídrido de carbónico CO_2.
- 0.7% en volumen de agua H_2O
- ≤ 5% de hidrógeno H_2, ácido sulfhídrico H_2S, y otros gases.[60]

Salvo por el contenido de H_2S, el biogás es un combustible que puede ser utilizado por un equipo electrógeno, estufas, calentadores, celdas de combustible, entre otros.[61]

[60] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Op. Cit. p. 14

[61] BESEL, S.A., Departamento de Energía. Biomasa, digestores anaerobios [online]. Instituto de diversificación y ahorro de la energía. [citado 28 de Julio]. Disponible en internet: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

1.5 BIODIGESTORES

En el proceso de digestión anaerobia se utiliza un reactor herméticamente sellado para almacenar el material orgánico, puede ser construido de diferentes formas, tamaños o materiales[62] de manera que se aseguren las condiciones ideales para que las bacterias fermenten el material orgánico en condiciones libres de oxígeno.[63] En el proceso de digestión se forma el biogás, por lo que el tanque debe disponer de algún sistema que le permita capturarlo controlando su presión y evitando su mezcla con aire atmosférico[64], el diseño debe asegurar que las condiciones sean óptimas para el crecimiento microbiano y la obtención del biogás,[65] en el Cuadro 2, se muestran algunas de las ventajas y desventajas del uso de un sistema de biodigestión anaerobio.

Cuadro 2. Ventajas y desventajas del uso de un biodigestor anaerobio

Ventajas	Desventajas
Reducción de la contaminación ambiental debido a la destrucción de microorganismos aerobios.	Sistema estrictamente anaerobio, limitado a la no presencia de oxígeno (elemento abundante en la atmósfera).
La degradación de biomasa en biogás proporciona energía a bajo costo	Precisa de bacterias concretas para cada fase del proceso.
Es posible usar los efluentes del proceso como bio-abono reduciendo el uso de fertilizantes químicos.	Cada bacteria requiere ciertas condiciones de operación estrictas para evitar su inhibición.[66]
Beneficios económicos debido a la sustitución de la energía no-renovable y los fertilizantes químicos. [67]	

Fuente: elaboración propia

[62] PACHECO GONZÁLEZ, Sebastián Isaac. Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. 2016. p. 24.

[63] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Guía para la implementación de sistemas de producción de Biogás, versión 01, Bogotá D.C, ICONTEC-AENE, 2003, p. 9.

[64] PACHECO GONZÁLEZ Op. Cit. p. 24

[65] GARCIA RODRIGUEZ, Angie Mariana y GÓMEZ FRANCO, Juan Daniel. Evaluación de la producción de Biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de Abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Tesis. Fundación Universidad de América.2016. p. 36

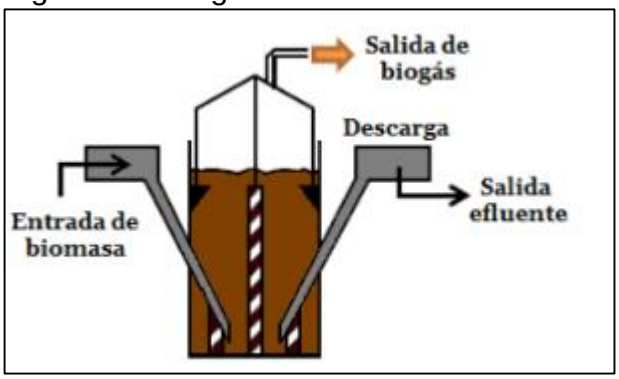
[66] GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto; PEREZ SARIÑANA, Bianca Yadira y COMETTA CONDE, Silvia C. Biogás: Alternativa ambiental en el manejo de residuos para su uso como energético sustentable. España: Editorial Académica Española, 2015. ISBN 978-3-659-07190-4

[67] UNIVERSO PORCINO. Beneficios en el uso de biodigestores. Argentina, 2011 [En línea] [Revisado 28 de agosto de 2018]. Disponible en internet: http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/internacionales_porcinas_01-2011_beneficios_en_el_uso_de_biodigestores.html

1.5.1 Tipos de biodigestores. En el mercado podemos encontrar una amplia variedad de digestores anaerobios, estos se diferencian de acuerdo a parámetros como el volumen, el modelo conceptual, el número de tanques, orientación, etc., a continuación, se detallan algunos de los más importantes:

1.5.1.1 Domo flotante: este tipo de biodigestor (Figura 4) también es conocido como tipo Hindú, consiste en un tambor de fibra de vidrio reforzada en plástico con pared y fondo de ladrillo que se alimenta de manera semi-continua a través de un tubería de entrada.[68] La ventaja considerable es que trabaja a presión constante (debida al peso del domo), las desventajas radican en el movimiento que requiere el domo, lo cual implica costos adicionales en los materiales necesarios para la construcción y mantenimiento, sello hidráulico, etc.[69,70]

Figura 4. Biodigestor de domo flotante.



Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Guía para la implementación de sistemas de producción de Biogás, versión 01, Bogotá D.C, ICONTEC-AENE, 2003. p 21. Modificado por los autores.

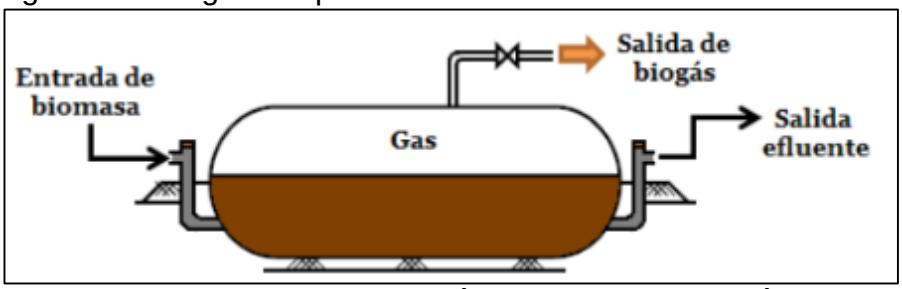
[68] BERNAL VÉLEZ, Daniela y QUINTERO GARZÓN, Daniela; Desarrollo de una propuesta para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el recodo de Tabio, Cundinamarca. Tesis. Fundación universal de América. Bogotá. 2016. p. 29

[69] CARRILLO, Leonor. Microbiología agrícola. Argentina.: Universidad Nacional de Salta, 2003. 151 p. ISBN 987-9381-16-5. p. 118

[70] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Op. Cit. p. 21

1.5.1.2 Tipo balón. Este modelo también es conocido como reactor de flujo pistón y consiste en una bolsa o balón plástico completamente sellado (Figura 5), donde el gas se almacena en la parte superior[71,72].
Su mayor ventaja es que la instalación es rápida y sencilla y adicionalmente, los tiempos de retención son más cortos en comparación con el reactor tipo domo flotante. Tiene como desventajas, que presenta problemas de homogeneidad y debido a su baja presión es necesario colocar sobrepesos al balón para aumentarla, su vida útil es de aproximadamente 5 años, y el material plástico debe ser resistente a la intemperie y a los rayos ultravioletas.[73,74]

Figura 5. Biodigestor tipo balón.

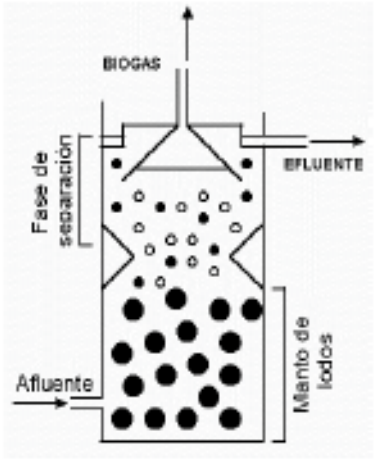


Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Guía para la implementación de sistemas de producción de Biogás, versión 01, Bogotá D.C, ICONTEC-AENE, 2003. p 22. Modificado por los autores.

1.5.1.3 Tipo UASB: el reactor Anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos (Figura 6), UASB por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)[75] fue desarrollado en los años 70 y ahora es aplicado mundialmente en países de clima tropical para tratar efluentes locales.[76] Es un sistema trifásico que consiste en una columna abierta a través de la cual el residuo se transporta a baja velocidad de manera ascendente[77] y cuenta con un separador de gases en la parte superior del reactor para retener el lodo.[78]

[71] BERNAL. Op. Cit. p. 29
[72] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Op. Cit. p. 22
[73] GARCIA RODRIGUEZ. Op. Cit. p. 39
[74] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Op. Cit. p. 22
[75] PACHECO. Op. Cit. p. 26
[76] BERNAL. Op. Cit. p. 29
[77] GUERRERO FAJARDO. Op. Cit. p. 41
[78] GARCIA RODRIGUEZ. Op. Cit. p. 41

Figura 6. Biodigestor tipo UASB



Fuente: GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto; PEREZ SARIÑANA, Bianca Yadira y COMETTA CONDE, Silvia C. Biogás: Alternativa ambiental en el manejo de residuos para su uso como energético sustentable. p 68. Modificado por los autores.

1.5.1.4 Otros tipos de biodigestores. Existen otros tipos de digestores desarrollados recientemente y en proceso de investigación entre los cuales pueden nombrarse los de filtro anaeróbico, reactor de deflector anaeróbico, procesos de contacto anaeróbico, digestores tubulares inclinados, etc.[79]

1.6 ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

En el proceso de degradación anaerobia del material orgánico intervienen diversos grupos de bacterias anaerobias facultativas y anaerobias estrictas, dependiendo del tipo de producto que resulta de cada degradación estas se clasifican en tres grupos:

- Grupo I: bacterias hidrolíticas y fermentativas
- Grupo II: bacterias acetogénicas.
- Grupo III: bacterias metanogénicas

A continuación se dará una explicación breve acerca de los grupos mencionados anteriormente. Teniendo en cuenta que será de gran importancia para seguir desarrollando el tema tratado en este trabajo de grado.

[79] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Op. Cit. p. 23

1.6.1 Bacterias hidrolíticas y fermentativas. Estas bacterias son las encargadas de producir enzimas extracelulares para poder realizar la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos produciendo moléculas más sencillas tales como azucares, aminoácidos, ácidos grasos y alcoholes; un resumen de estos procesos se muestra en el Cuadro 3. Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son anaerobias facultativas, las cuales pueden desarrollarse tanto en presencia o ausencia de oxígeno.[80][81]

Al estar en un proceso anaerobio, las bacterias hidrolíticas necesitan generar energía y está la obtiene por medio del catabolismo de la glucosa, el glicerol y aminoácidos. Al catabolismo de la glucosa se le conoce con el nombre de "Glucólisis".[82][83]

Cuadro 3. Resumen del catabolismo de los polímeros orgánicos

POLÍMERO	MONÓMERO	CATABOLISMO	ACIDIFICACIÓN
Celulosa	Glucosa	Piruvato	Ácido acético
Lípidos	Glicerol	Piruvato	Ácido acético
Proteínas	Aminoácidos	Propionato	Ácido propiónico
		2-Alquil-Acetato	Ácido acético
		Butirato	Ácido Butírico

Fuente: DE LA MERCED JIMÉNEZ, Diego. Biogás: Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo contínuo. p. 28. Modificado por los autores.

1.6.2 Bacterias acetogénicas. Estas bacterias ayudan al proceso de conversión de los productos de fermentación a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono además, convierten ácido propiónico y butírico en ácido acético mediante las reacciones relacionadas en el Cuadro 4. Las bacterias acetogénicas producen reacciones energéticamente complicadas que se interrumpen fácilmente por la acumulación de hidrógeno disuelto en el medio donde se realiza dicha reacción. Hay un grupo de bacterias llamadas "homoacetogénicas", las cuales son anaerobias obligadas, por lo tanto, utilizan el dióxido de carbono como receptor final de electrones, así es como mediante distintas reacciones se tiene como producto, el acetato.[84][85]

[80] DIAZ. Op. Cit. p. 40
[81] GARCIA. Op. Cit. p. 34
[82] MATHEWS, Christopher y VAN HOLDE, K.E. Bioquimica 3ed, España.: PEARSON EDUCACIÓN, S. A., Madrid, 2002. ISBN: 978-84-832-2694-0 Materia: Bioquímica, 577 p. 504
[83] DE LA MERCED JIMÉNEZ, Diego. Biogás: Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo. Tesis. UNIVERSIDAD VERACRUZANA. Xalapa Enríquez. 2012. p. 28
[84] DIAZ. Op. Cit. p. 40
[85] LOPEZ. Op. Cit. p. 72

Cuadro 4. Resumen del catabolismo de los polímeros orgánicos

TIPO	REACCIÓN GLOBAL	NOMBRE CIENTÍFICO
Ácido Propiónico	$Lactato^- \rightarrow Propionato^- + Acetato^- + CO_2$	Propionibacterium Clostridium propionicum
Ácido Butírico	$Hexosas \rightarrow Butirato^- + Acetato^- + H_2 + CO_2$	Clostridium butyricum

Fuente: DE LA MERCED JIMÉNEZ, Diego. Biogás: Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo. p. 28. Modificado por los autores

1.6.3 Bacterias metanogénicas. También llamadas acetoclásticas, se encuentran distribuidas en la naturaleza. Estas bacterias tienen como principal producto el metano a pesar de sus requerimientos y metabolismo especializado que es característico de este grupo. Convierten el ácido acético en dióxido de carbono y metano La actividad de estas bacterias se ve incrementada en ecosistemas de agua dulce o terrestre, mientras que en ecosistemas cargados de sulfatos, como el océano, se ve disminuida de manera considerable.[86][87][88]

A continuación, en el Cuadro 5 se observan los sustratos convertibles a metano y posteriormente se muestran las reacciones que experimentan éstos sustratos para la producción de gas metano.

[86] DIAZ. Op. Cit. p. 55
[87] GARCIA. Op. Cit. p. 35
[88] LOPEZ. Op. Cit. p. 74

Cuadro 5. Sustratos convertibles a metano

SUSTRATO	COMPUESTO	FORMÚLA QUÍMICA
Tipo CO_2	Anhidro carbónico	CO_2
	Formiato	$HCOO^-$
	Mónoxido de Carbono	CO
Tipo Metilo	Metanol	CH_3OH
	Metilamina	$CH_3NH_3^+$
	Dimetilamina	$(CH_3)_2NH_2^+$
	Trimetilamina	$(CH_3)_3NH^+$
	Metilmercaptano	CH_3SH
	Dimetilsulfuro	$(CH_3)_2S$
Tipo Acetotrófico	Acetato	CH_3COO^-

Fuente: DE LA MERCED JIMÉNEZ, Diego. Biogás: Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continúo. p. 29. Modificado por los autores

Las reacciones que producen el metano (CH_4) son a partir del anhidro carbónico (CO_2) y acetato (CH_3COO^-). Sus reacciones globales son como siguen

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

En esta reacción se libera energía de 131 kJ.

$$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$$

En la reacción para la conversión de acetato a metano, se libera energía de 31 kJ.[89]

[89] DE LA MERCED JIMÉNEZ, Diego. OP. Cit: p. 29.

2. CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO

En el presente capítulo se desarrolla la caracterización del residuo, con el fin de identificar las fuentes, características y cantidad del mismo, adicionalmente permite plantear alternativas de solución para poder darles un manejo adecuado y disminuir la contaminación que estos puedan causar al medio ambiente.

La caracterización de residuos para efectos de la presente investigación tiene como objetivos:

- Recopilación de información secundaria
- Identificación de las fuentes de generación
- Clarificación y cuantificación de los residuos generados
- Estimación del potencial económico y energético que representan los residuos no aprovechados.

Adicionalmente se realizó una evaluación fisicoquímica para determinar las condiciones iniciales del residuo y de esta manera confirmar que el mismo era apropiado para realizar el proceso de biodigestión, el protocolo de caracterización seguido para efectos de éste capítulo se detalla en el Anexo A.
En la Figura 7 se muestra una mezcla de residuos orgánicos realizada en Campo Rubiales por la empresa Biotech Ambiental durante el periodo de operación del biorreactor.

Figura 7. Mezcla de residuos orgánicos

Fuente: Biotech Ambiental

2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS

Se realizó el diagnóstico de la generación de residuos en el campo teniendo en cuenta cada uno de los procesos y sub-procesos que se efectúan en las actividades de exploración y producción, se identificaron como fuentes generadoras el campamento, las oficinas, la enfermería, el taller de mantenimiento y las torres de perforación. En la Cuadro 6 se pueden observar los tipos de residuos generados por cada fuente.

Cuadro 6 Clasificación de residuos generados por fuente de generación

Fuente	Residuos
Campamento	Restos de alimentos, aceite usado vegetal, botellas plásticas, latas, envases de vidrio, papel y cartón, pilas, residuos no reciclables (Desechables y servilletas), Empaques de implementos de aseo personal
Oficinas	Cartuchos de impresoras, papel, plásticos, lapiceros, correctores y marcadores, lámparas y bombillos, pilas, residuos orgánicos.
Enfermería	Jeringas usadas, gasas usadas, algodón, agujas, cuchillas, empaques de fármacos, residuos orgánicos, vidrio.
Taller de mantenimiento	Madera, chatarra, aceite usado mineral, baterías, aceite y combustible, Icopor, concreto.
Torres de perforación	Lodos de perforación, agua de formación, aceite usado, residuos químicos, Residuos impregnados con químicos, combustible, crudo o pintura.

Fuente: elaboración propia

Una vez identificados los residuos generados por las respectivas fuentes se procedió a realizar una cuantificación de los mismos, sin embargo, ya se contaba con datos anuales de la generación de residuos categorizados en residuos orgánicos, reciclables, ordinarios y peligrosos (Hospitalarios e industriales) donde cada categoría incluye los residuos provenientes de todas las fuentes, de esta manera, se obtienen los datos de generación que se muestran en la Tabla 1, a continuación:

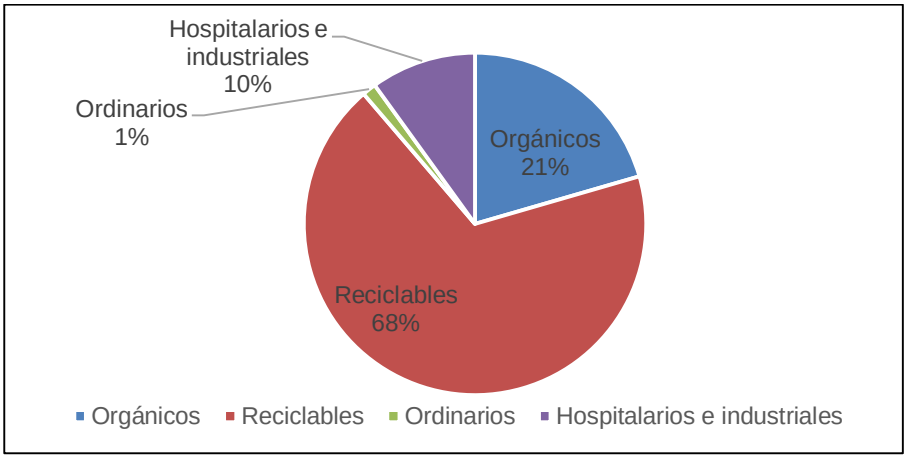
Tabla 1. Datos de generación de residuos

Tipo de residuo	Kg/día	Proporción
Orgánicos	3825	20.5%
Reciclables	12719	68.2%
Ordinarios	245	1.3%
Hospitalarios e industriales	1858	10.0%

Fuente: elaboración propia

Para comprender mejor los datos descritos anteriormente se generó la Gráfica 1, en donde se puede observar que la mayor cantidad de residuos son reciclables, sin embargo, el campo ya cuenta con empresas que efectúan el tratamiento y disposición de los mismos; en segunda medida se encuentran los residuos orgánicos, los cuales son el objeto principal del presente estudio, sin embargo, el residuo analizado también posee cierto contenido de algunos de los residuos industriales, como por ejemplo, los lodos de perforación.

Gráfica 1. Composición de los residuos generados en campo.



Fuente: elaboración propia

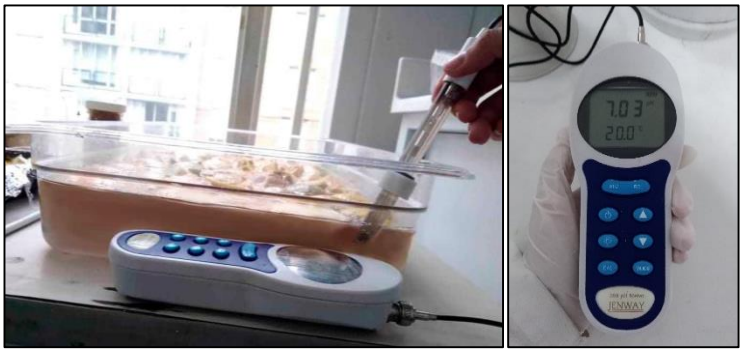
2.2 EVALUACIÓN FISICOQUÍMICA DEL RESIDUO

La evaluación fisicoquímica del residuo se realizó con el fin de conocer el pH, temperatura, densidad, humedad, materia orgánica y DQO; la determinación de dichas variables se llevó a cabo por medio de pruebas de laboratorio específicas para cada dato y nos permiten analizar el potencial teórico de generación de biogás que puede tener la biomasa en estudio.

2.2.1 Determinación del pH y temperatura inicial. Se realizó la determinación del pH y la temperatura (Figura 8) con ayuda de un pH-metro modelo 350 de la marca Jenway, realizar esta medición es imprescindible puesto que las bacterias únicamente pueden sobrevivir a ciertos rangos de pH[90] y la temperatura a la que se encuentra el residuo puede dar una idea inicial acerca del tiempo de retención de la biomasa en el proceso de digestión.[91]

[90] PACHECO. Op. Cit. p. 30
[91] PEREZ MEDEL, Javier Andres. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Tesis. Universidad de Chile. 2010. p. 29

Figura 8. Proceso de toma de pH y temperatura



Fuente: Elaboración propia

La medida se realizó por duplicado y los resultados se muestran en las Tablas 2 y 4 para el pH y la temperatura respectivamente.

Tabla 2. Resultados de pH del residuo

Muestra	pH	Promedio
R1	7.03	7.095
R2	7.16	

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo reportado en la toma de pH se puede observar que en promedio, la muestra presenta un pH de 7.095, es decir que el residuo posee pH neutro y el mismo es adecuado para el proceso de biodigestión formado un ambiente apropiado para el crecimiento de las bacterias.

En la Tabla 3 se puede observar una comparación entre el pH promedio del residuo objeto de investigación y otros pH obtenidos para biomasas usadas en procesos de biodigestión.

Tabla 3. Comparación de pH

Referente	pH
Los autores	7.095
Ramírez, et al. 2010[92]	7.1
Pacheco Gonzales. 2016[93]	6.8
García y Gómez. 2016	6.95
García y Gómez. 2016	7.23
García y Gómez. 2016[94]	6.7

Fuente: elaboración propia

El pH obtenido en el proyecto se encuentra entre el rango de pH de otras biomasas tratadas por medio de digestión anaerobia, todos los datos reportados muestran pH neutro y por tal motivo no registran protocolos de ajuste de pH.

Tabla 4. Resultados de temperatura del residuo

Muestra	T (°C)	Promedio (°C)
R1	20	20
R2	20	

Fuente: elaboración propia

Para el caso de la Temperatura el resultado arrojado por el pH-metro fue el mismo para ambas muestras, razón por la cual se confirmó con un termómetro de mercurio arrojando el mismo resultado; los autores generalmente no reportan la temperatura inicial del residuo, razón por la cual no se realiza una comparación de temperaturas con las obtenidas por otros autores, no obstante, la determinación de ésta permite determinar el tiempo de retención del reactor; según lo reportado por Pérez[95], para temperaturas de operación de 18 °C se recomienda un tiempo de retención de 18 días.

[92] RAMIREZ, Julio Cesar., et al. Ingeniería básica para el proceso de generación de Biogás, a partir de porquinaza. En: Revista publicaciones e investigación. Agosto, 2010. Vol. 4. p. 95
[93] PACHECO. Op. Cit. p. 64
[94] GARCÍA RODRIGUEZ, Angie Mariana y GÓMEZ FRANCO, Juan Daniel. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Tesis. Bogotá D.C: Fundación universidad de América. 2016. p. 104
[95] PEREZ. Op. Cit. p.29

2.2.2 Determinación de densidad. Al ingresar la biomasa a la tolva de alimentación únicamente se conoce su peso, sin embargo, es posible conocer el volumen de residuo que ingresa al proceso a partir de la determinación de la densidad del residuo, en este caso por método volumétrico (Figura 9), el proceso se realizó por duplicado y para ello se usó un picnómetro de 5 mL.

Figura 9. Proceso determinación de densidad

Fuente: elaboración propia

El proceso inicia secando 2 picnómetros en una estufa a 80°C, éstos se dejan secar en el desecador y se toma su peso vacío, posteriormente se llenan con las muestras R1 y R2 y se toma su peso, la densidad del residuo se calcula a partir de la siguiente ecuación[96]:

Ecuación 1. Determinación de densidad

$$\rho = \frac{masa}{volumen} = \frac{W_L - W_V}{V_p}$$

Fuente: BROWN, Theodore L., et al. Química La ciencia central. 9 ed. México.: Pearson Educación de México, 2004. 1152 p. ISBN 970-26-0468-0

Donde:
W_L= Peso del picnómetro lleno
W_V = Peso del picnómetro vacío
V_p = Volumen del picnómetro

A continuación se realiza una muestra de cálculos para la muestra R1 obteniendo el siguiente resultado:

[96] BROWN, Theodore L., et al. Química La ciencia central. 9 ed. México.: Pearson Educación de México, 2004. 1152 p. ISBN 970-26-0468-0

$$\rho = \frac{15.9142\ g - 9.8943\ g}{5\ mL} = 1.20398\ \frac{g}{mL} = 1203.98\ \frac{kg}{m^3}$$

El mismo cálculo se realizó para la muestra R2 teniendo en cuenta que el peso del picnómetro vacío fue de 9.9232 g y el del picnómetro lleno de 16.0833 g Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5 junto a su valor promedio obtenido.

Tabla 5. Resultados del contenido de humedad total

Muestra	Densidad kg/m^3	Promedio kg/m^3
R1	1203.98	1218.00
R2	1232.02	

Fuente: elaboración propia

En promedio la muestra posee una densidad de 1218.00 kg/m3, y como puede observar a continuación en la Tabla 6 es cercana a otras densidades obtenidas para residuos usados en procesos de biodigestión sin embargo, al ser ligeramente mayor se podría decir que posee más contenido de sólidos y por tanto se podría esperar que también posea mayor materia orgánica y mayor DQO.

Tabla 6. Comparación de DQO

Referente	Densidad (kg/m^3)
Los autores	1218.00
Carrasco Allendes. 2015[97]	1020.00
Rodríguez Miranda. 2010[98]	1083.00
Pérez Medel. 2010[99]	1160.00
Ramírez, et al. 2010[100]	1205.00

Fuente: elaboración propia

[97] CARRASCO ALLENDES, Juan Luis. Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos. Tesis de maestría Santiago de Chile.: Universidad de Chile. 2015. p. 49

[98] RODRIGUEZ MIRANDA, Nelson Andrés. Estudio de factibilidad técnica y financiera de utilización de biomasa para suplir necesidades energéticas en el edificio de bienestar universitario. Tesis Bucaramanga.: Universidad industrial de Santander. 2010. p. 47

[99] PEREZ. Op. Cit. p.29

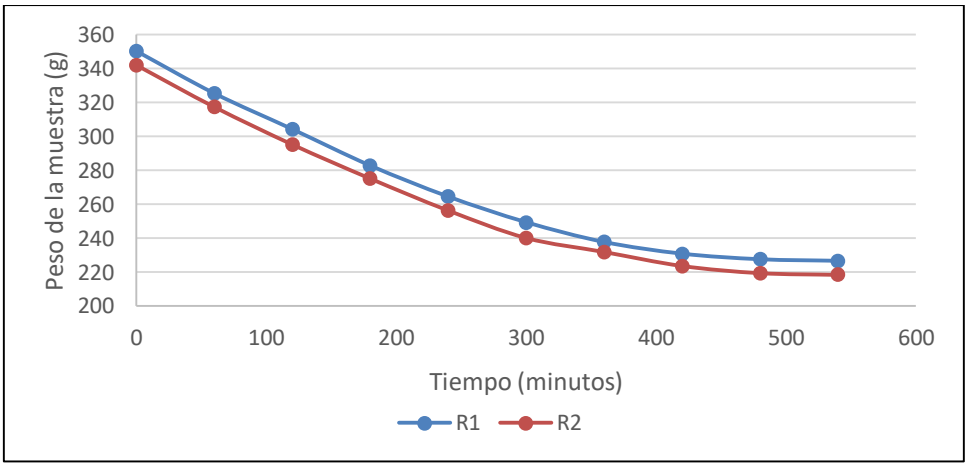
[100] RAMIREZ. Op. Cit. p. 95

2.2.3 Análisis de humedad. Se procedió a realizar el análisis de humedad en conformidad con lo establecido en la norma ASTM D 3302 – 02a "*Standard test method for total moisture in coal*"[101] la cual es usada para determinar humedades en muestras con alto contenido de carbono, en ella se indica que el proceso se debe realizar en un horno de secado al aire a 40 °C, sin embargo, la determinación del contenido de humedad se realizó por duplicado en una plancha de calentamiento marca Dathan Scientific puesto que no se contaba con el equipo indicado, no obstante, el mismo resulta ser similar al indicado en la norma.

Se depositó la muestra en cápsulas de porcelana las cuales fueron taradas previamente, en la primera cápsula (R1) se depositaron 212.11 g de muestra y en la segunda (R2) 211.80 g, se precalentó la plancha a la temperatura indicada (40°C) y se tomó el peso de los recipientes cada hora hasta que el cambio del peso de ambas muestras fue mínimo (variación inferior al 0.5%).

A continuación, en la Gráfica 2 se puede observar el comportamiento del peso de las muestras.

Gráfica 2. Variación de peso de las muestras para determinación del contenido de humedad



Fuente: elaboración propia

Las muestras tardaron 540 minutos en llegar a peso constante y para este punto la muestra R1 obtuvo un peso de 88.33 g y la muestra R2 de 88.10 g; una vez conocidos estos pesos se procedió a realizar el cálculo del contenido de humedad de la muestra a partir de la Ecuación 2.

[101] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard test method for total moisture in coal*. [En línea]. [Revisado 18 de agosto 2018]. Disponible en internet: https://es.scribd.com/doc/213236720/D3302-Standard-Test-Method-for-Total-Moisture-in-Coal

Ecuación 2. Porcentaje de humedad

$$R = \left[\frac{(W - H)}{W}\right] \times 100$$

Fuente: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard test method for total moisture in coal*.

Donde:

R = Humedad de la muestra [% Peso]
W = Peso de la muestra usada [g]
H = Peso de la muestra luego del secado [g]

Es importante tener en cuenta que el peso a usar en la ecuación corresponde únicamente al peso de la muestra o residuo, es decir, que se debe restar el peso de la cápsula al peso reportado por la balanza analítica antes de aplicarla.

A continuación, se realiza una muestra del cálculo para la muestra R1 obteniendo el siguiente resultado:

$$R = \left[\frac{(212.11\ g - 88.33\ g)}{212.11\ g}\right] \times 100 = 58.36\%$$

De igual manera se realizó el cálculo para la muestra R2 y los resultados se muestran en la Tabla 7 junto con su valor promedio.

Tabla 7. Resultados del contenido de humedad total

Muestra	**% Humedad**	**Promedio (%)**
R1	58.36	58.38
R2	58.40	

Fuente: elaboración propia

De esta manera, se obtuvo una humedad promedio de 58.38%, adicionalmente, como se puede observar en la Gráfica 2, las curvas de secado para ambas muestras tienen un comportamiento similar, esto indica que el residuo puede considerarse homogéneo y por esta razón, todos los análisis fisicoquímicos que se realicen a la muestra son pertinentes y representan el contenido total de los residuos orgánicos obtenidos en el campo.

Tabla 8. Comparación de humedades totales

Referente	% Humedad
Los autores	58.38
García y Gómez. 2016[102]	80 - 90
Bernal y Quintero. 2016[103]	25.5
Pacheco Gonzáles. 2016[104]	29.4

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 8 se muestra una comparación entre la humedad obtenida para la muestra analizada en el presente estudio y tres biomasas diferentes usadas para la producción de biogás, se puede observar que si bien la desviación estándar para las humedades de los residuos comparados es alta, la de la muestra analizada se encuentra en medio de las mismas, adicionalmente, Peña[105] indica que la materia orgánica que posee un porcentaje de humedad superior al 50% puede ser aprovechada energéticamente mediante algún proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia; de esta manera, el alto contenido de humedad indica que la cantidad de agua ya incluida en el residuo es suficiente para generar una biomasa efectiva y teniendo en cuenta la escasez de agua en la zona, esto reducirá el consumo de agua sólo al lavado de equipo y áreas del biodigestor.

2.2.4 Determinación de materia orgánica. Se realiza la determinación de materia orgánica (Figura 10) en conformidad con lo estipulado en la norma NTC 5167 "*Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo"*,[106] para ello se usó una mufla marca B&M modelo MBT7.500, la cual se programó para operar a 650 °C durante 240 min siguiendo el protocolo detallado en el Anexo B.

[102] GARCÍA. Op. Cit. p. 74
[103] BERNAL. Op. Cit. p. 34
[104] PACHECO. Op. Cit. p. 51
[105] PEÑA MARTÍN, Gonzalo. Tabla de composición de alimentos. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. Guía Para La Implementación De Sistemas De Producción De Biogás. 01 ed. Bogotá D.C: 2003.
[106] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. NTC-5167 Bogotá D.C., Colombia. 23 de marzo de 2011.

Figura 10. Proceso de determinación de materia orgánica

Fuente: elaboración propia

El proceso se realizó por duplicado en crisoles de porcelana previamente tarados, se depositaron 5.04 g en el primer crisol (R1) y 5.10 g en el segundo (R2), las muestras se llevaron a la mufla durante los 240 min establecidos por la norma y al finalizar este proceso se pesaron nuevamente los crisoles obteniendo pesos de 0.3141 g y 0.3143 g de muestra respectivamente. Una vez conocidos estos datos se procede a calcular el porcentaje de materia orgánica contenida en el residuo a partir de las ecuaciones 3 y 4.

Ecuación 3. Porcentaje de cenizas

$$\%Cenizas = \left[\frac{peso\ final}{peso\ inicial} \times 100\right]\left[\frac{100 - \%humedad}{100}\right]$$

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo

Ecuación 4. Porcentaje de materia orgánica

$$\%Materia\ orgánica = 100 - \%cenizas$$

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo

A continuación, se realiza una muestra de cálculos para la primera muestra (R1) teniendo en cuenta que el termino *%humedad* a ingresar en la Ecuación 3 es el mismo que fue obtenido durante el análisis de humedad.

$$\%Cenizas = \left[\frac{0.3141\ g}{5.04\ g} \times 100\right]\left[\frac{100 - 58.38}{100}\right] = 2.59\%$$

$$\%Materia\ orgánica = 100 - 2.59 = 97.41\%$$

Los mismos cálculos se realizaron para la muestra R2 y los resultados se muestran en la Tabla 9 al igual que su valor promedio.

Tabla 9. Resultados del contenido de materia orgánica

Muestra	%Materia orgánica	Promedio (%)
R1	97.41	97.42
R2	97.44	

Fuente: elaboración propia

Se obtuvo un promedio de materia orgánica de 97.42%, a continuación, en la Tabla 10 se muestra una comparación entre el residuo objeto de estudio y otros tres residuos usados para la obtención de biogás.

Tabla 10. Comparación de Materia orgánica

Referente	% Materia orgánica
Los autores	97.42
Cadavid y Bolaños. 2015[107]	85.96
Pacheco Gonzales. 2016[108]	95.10
Diniz, et al. 2015[109]	85.21

Fuente: elaboración propia

Observe que tal y como se intuyó en la sección 2.2.2 el residuo objeto de estudio posee un mayor contenido de materia orgánica que los residuos en comparación, lo que resulta ser un buen indicativo pues la materia orgánica es lo que se degradará en el proceso para convertirla en biogás.

[107] CADAVID RODRÍGUEZ, Luz Stella y BOLAÑOS VALENCIA, Ingrid Vanessa. Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. En: Energética. Diciembre, 2015. ISSN 0120-9833. p. 25

[108] PACHECO. Op. Cit. p. 51

[109] DINIZ GUERI, Matheus Vitor., et al. Food waste anaerobic digestión of a popular restaurant in Southern Brazil. En: Journal of Cleaner Production. Mayo, 2018. p 7

2.2.5 Demanda química de oxígeno (DQO). La DQO es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada por medios químicos en una muestra y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O_2/L);[110] la determinación de la demanda química de oxígeno se realiza a la biomasa inicial y al sustrato obtenido puesto que teóricamente se conoce que 1 kg de DQO eliminada produce 350 L de metano.[111]

El proceso de determinación de DQO se realizó por medio de colorimetría (Figura 11) basados en la norma NTC 3629 "*Demanda química de oxígeno (DQO)*"[112], el protocolo de determinación de DQO se encuentra en el Anexo C.

Figura 11. Determinación de DQO por método colorimétrico

Fuente: elaboración propia

El proceso se realizó en un espectrofotómetro marca Jenway modelo 6300 y como se indica en el protocolo el proceso inició con la preparación de los nueve estándares para la obtención de la curva de calibración (Gráfica 3), las absorbancias obtenidas para cada una de éstas muestras se pueden observar en la Tabla 11.

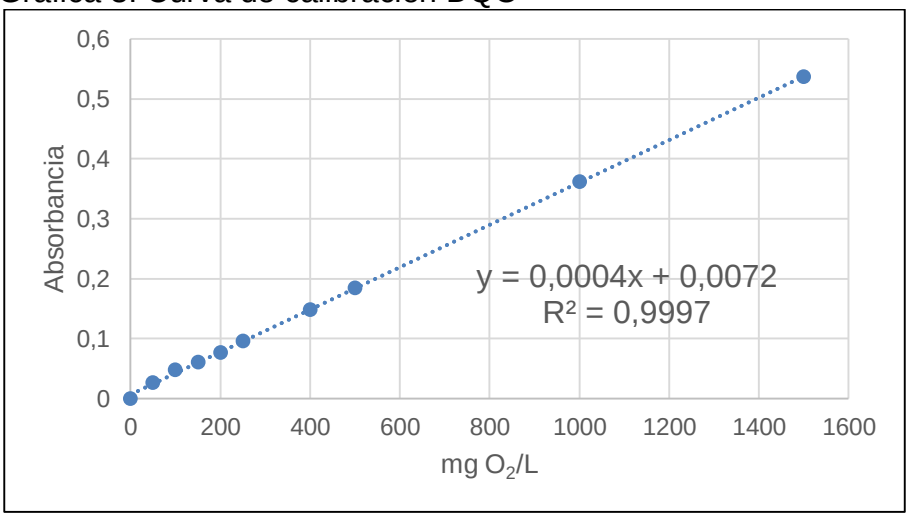
[110] GUERRA MILLÁN. Francisco Javier., STRUCK GARZA, Adelwat y VILLALOBOS STETA, Santiago Andrés. Caracterización de aguas residuales. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Universidad Iberoamericana. Ciudad de México. México D.F. [en línea] 8 de septiembre de 2008 [revisado 15 de Octubre de 2018]. Disponible en internet: https://es.scribd.com/document/355498490/169162163-Caracterizacion-de-Aguas-Residuales
[111] PEREZ. Op. Cit. p.31
[112] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua. Demanda química de oxígeno DQO. NTC-3629 Bogotá D.C., Colombia. 20 de mayo de 2015.

Tabla 11. Datos de absorbancia para la obtención de la curva de calibración DQO

mg O_2/L	Absorbancia
0	0
50	0.027
100	0.048
150	0.061
200	0.077
250	0.096
400	0.148
500	0.185
1000	0.362
1500	0.537

Fuente: elaboración propia

Gráfica 3. Curva de calibración DQO



Fuente: elaboración propia

Como puede observar, en la Gráfica 3 se obtuvo una línea recta y en ella se presenta la ecuación que reportó un coeficiente de correlación lineal de 0.9997; a partir de ésta se determina la concentración de O_2 disuelto en la muestra residual, la ecuación mencionada es:

Ecuación 5. Ecuación de la recta para la curva de calibración

$$Absorbancia = \left(0.0004 \times \frac{mg\ O_2}{L}\right) + 0.0072$$

El cálculo para la determinación de DQO se realiza a partir de la Ecuación 6 como se muestra a continuación:

Ecuación 6. Ecuación para la determinación de DQO

$$DQO = \frac{\frac{mg\ O_2}{L}\ leidos\ en\ la\ curva\ de\ calibración\ \times 10}{mL\ de\ muestra\ usados\ para\ el\ ensayo} \quad \left[\frac{mg}{L}\right]$$

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua. Demanda química de oxígeno DQO. NTC-3629 Bogotá D.C., Colombia. 20 de mayo de 2015.

El proceso se realizó por duplicado y se obtuvieron absorbancias de 0.515 y 0.518 para las muestras R1 y R2 respectivamente, a continuación, se realiza una muestra de cálculos para la obtención de la DQO en la muestra R1.
Iniciamos despejando el término $\frac{mg\ O_2}{L}$ de la Ecuación 5 y obtenemos:

$$\frac{mg\ O_2}{L} = \frac{Absorbancia - 0.0072}{0.0004} = \frac{0.515 - 0.0072}{0.0004} = 1269.50\frac{mg\ O_2}{L}$$

Reemplazando en la Ecuación 6:

$$DQO = \frac{1269.50\frac{mg\ O_2}{L}\ \times 10}{10\ mL} = 1269.50\frac{mg}{L}$$

El mismo procedimiento se realizó para la muestra R2 y los resultados se muestran en la Tabla 12 al igual que su valor promedio.

Tabla 12. Resultados del contenido de DQO

Muestra	**DQO (mg O_2/L)**	**Promedio (mg O_2/L)**
R1	1269.50	1273.25
R2	1277.00	

Fuente: elaboración propia

Se obtuvo un promedio de DQO de 1273.25 mg O_2/L, a medida que ocurre la degradación de la materia orgánica, la cantidad a ser oxidada disminuye[113], por lo que en este proceso de degradación se pretende disminuir la DQO con el tiempo.
A continuación, en la Tabla 13 se muestra una comparación de la DQO obtenida para la biomasa analizada en el presente estudio y otras 4 biomasas usadas para la producción de biogás, observe que, si bien la DQO obtenida en el presente estudio es mayor a las demás, el resultado es cercano y esto únicamente indica que hay mayor cantidad de materia orgánica a ser oxidada.

Tabla 13. Comparación de DQO

Referente	DQO (mg O_2/L)
Los autores	1273.25
García y Gómez. 2016	1097.25
García y Gómez. 2016[114]	1142.25
Ipuz y Reyes. 2015	1240.00
Ipuz y Reyes. 2015[115]	1166.00

Fuente: elaboración propia

2.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

Luego de completar el protocolo de caracterización se obtienen los resultados que nos permiten conocer el estado inicial de la biomasa, a continuación, en la Tabla 14 se muestra un resumen de dichos resultados.

Tabla 14. Resumen caracterización de la biomasa

Análisis	Resultado
Generación	3825 kg/día
pH	7.095
Temperatura	20 °C
Densidad	1218 kg/m^3
Humedad	58.38%
Materia orgánica	97.42%
DQO	1273.25 mg/L

Fuente: Elaboración propia

[113] BERNAL. Op. Cit. p. 28
[114] GARCÍA. Op. Cit. p. 74
[115] IPUZ GONZÁLES, Alejandra María y REYES CÁRDENAS, María Angélica. Diseño, construcción y arranque de un Reactor Anaerobio de flujo a Pistón (RAP) con guadua como medio de soporte, para el tratamiento de agua residual doméstica de un campamento de trabajadores de una piscícola. Tesis. Universidad de la Salle. Bogotá D.C. 2015. p.104

Observe que el residuo analizado es apto para la obtención de biogás puesto que posee un alto contenido de materia orgánica y de DQO, adicionalmente, como el residuo posee una humedad superior al 50% está listo para ser aprovechada energéticamente mediante el proceso de biodigestión; el residuo fue entregado por parte de Acipet en la ciudad Cajicá, este desecho fue transportado por tierra desde Campo Rubiales en tres bidones plásticos herméticos cuya masa total fue de 150Kg, cabe aclarar que los procesos de molienda y trituración ya habían sido previamente efectuados.

3. VARIABLES DE PROCESO EN LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS

En el presente capítulo se realiza una descripción de las generalidades acerca de la biomasa y un biorreactor a partir del análisis técnico de las variables influyentes en el proceso identificando de esta manera los efectos que tienen sobre la producción de biogás Posteriormente, teniendo en cuenta esta revisión bibliográfica, se realizó la selección de las variables y parámetros de proceso teniendo en cuenta aquellas variables que no se modifican pero si se deben mantener monitoreadas.

3.1 BIOMASA

La biomasa es la materia total de los seres (animales y vegetales) que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o volumen; mientras que para fines energéticos, se define como la materia orgánica originada en un proceso biológico, ya sea espontáneo o provocado, utilizado como fuente de energía.[116]

La biomasa es utilizada para extraer biogás en el caso de los rellenos sanitarios o en plantas anaerobias de tratamiento de residuos y puede ser de diversos tipos entre ellos se incluye la biomasa forestal, cultivos energéticos, residuos agrícolas, estiércoles, lodos de aguas residuales, entre otros.

3.1.1 Tipos de biomasa. La biomasa puede subdividirse en biomasa residual húmeda y seca. Dentro de la biomasa residual húmeda se encuentran todos los residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, el estiércol porcino y vacuno. La biomasa seca se clasifica según el sector productivo que la emite, este tipo de biomasa puede incluir residuos forestales de la industria maderera, residuos agroindustriales de la producción de alimentos, residuos de plantaciones, residuos de poda y maleza, residuos de mataderos de ganado, aceites y grasas, lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (industriales y residenciales), residuos sólidos urbanos y estiércol avícola.[117]

3.2 VARIABLES INFLUYENTES EN LA OPERACIÓN DEL BIOREACTOR

En un proceso de biodigestión anaeróbica se presentan factores que afectan el comportamiento del sistema y su funcionamiento, sin embargo, estos también dependen del tipo de biorreactor que se esté usando, como se indicó, en la sección 1.5.1 se describieron algunos tipos de biorreactores y a continuación, en el Cuadro 7 se muestra un breve resumen de los diferentes tipos de biodigestores para la selección del tipo adecuado para realizar el presente proyecto.

---

[116] DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA VIGÉSIMA SEGUNDA EDICIÓN.

[117] CHAMY, Rolando y VIVANCO, Elba. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la producción de biogás [online]. Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (GNE/ GTZ) [citado 28 de Julio; 18:21:02]

Cuadro 7. Tipos de biodigestor

Características	Domo flotante	Balón	UASB
Cámara de digestión	Esférica / semiesférica	Semiesférica	Angular
Presión del gas	Constante	Muy baja presión de gas, es necesario aumentar la presión con sobrepeso	Pueden darse caídas de presión debido a la retención de solidos
Localización óptima	Todos los climas	Todos los climas	Todos los climas
Vida útil	20 años	5 años	20 años
Ventajas	-Fácil manejo -El gas almacenado es visible a través del nivel de la campana	-Bajos costos de construcción -Fácil transporte e instalación -Construcción horizontal y plana que favorece en los lugares de alto nivel freático	-Bajos costos de operación al no requerir oxígeno -Puede manejarse con altas cargas intermitentes -Producción de metano aprovechable
Desventajas	-Alto costo de construcción de la campana -En la mayoría de los casos la campana es metálica y por eso sujeta a corrosión -Más costos de mantenimiento causado por trabajo de pintura	-El material plástico está sujeto a daños y tiene que ser protegido	-Las bacterias se inhiben con algunos compuestos -Generación de malos olores si no es eficazmente controlado

Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Guía para la implementación de sistemas de producción de Biogás. Modificado por los autores

Como puede observar, cada uno de ellos tiene ciertas ventajas y desventajas, sin embargo, se considera que el tipo de biodigestor que mejor se podría ajustar a las necesidades de un campo petrolero es el tipo UASB, esto debido a su prolongada vida útil, a los bajos costos de operación y al gran volumen de carga que pueden manejar.

A continuación, se realiza una descripción de las diferentes variables que afectan a éste tipo de reactores y la manera en que lo hacen:

3.2.1 Temperatura. La temperatura es una de las variables más importantes dentro de un proceso de digestión especialmente en los reactores que operan con microorganismos puesto que algunos de ellos únicamente sobreviven bajo ciertos rangos de temperatura así:

- Psicrófilos (<20 °C)
- Mesófilos (10-40 °C)
- Termófilos (45-70 °C)
- Hipertermófilos (>80 °C)

De acuerdo a la bibliografía consultada se encontró que algunos autores como Pacheco[118] indican que se favorece el proceso de metalogénesis al operar el biorreactor a temperaturas entre 32 y 42 °C.

Adicionalmente, la temperatura influye significativamente en el tiempo de retención de la materia orgánica dentro del biodigestor, esto determina los costos de operación debido a que se atribuye que a mayor temperatura es mayor el costo del proceso, se debe calentar el biodigestor sin superar la temperatura óptima de operación ya que esto presentaría una disminución exponencial en la tasa de crecimiento de las bacterias, las cuales son necesarias para la producción del metano.[119]

3.2.2 Humedad. Es el factor que relaciona la cantidad de agua con la cantidad de materia seca, según Guerrero, si el porcentaje de humedad es mayor a 50% se puede aprovechar realizando un proceso de fermentación o de digestión anaeróbica.[120]

---

[118] PACHECO. Op. Cit. p. 51

[119] GUERRERO FAJARDO. Op. Cit. p.32

[120] MANZANILLA LÓPEZ, Rosa y MARBÁN MENDOZA, Nahúm. Aspectos Biológicos De La Estabilización Aeróbica II. Mundi Prensa Libros, 2012. ISBN 9788484765677

3.2.3 Macronutrientes y micronutrientes. Es un factor con gran importancia al momento de elegir a qué residuo se le realizará un tratamiento por digestión, debido a que el carbón y el nitrógeno son los principales componentes que se requieren, al igual que se requieren microorganismos en cantidades relevantes. La mayoría de los microorganismos son heterótrofos y tienen distintas rutas para obtener el carbono; mediante sistemas enzimáticos permitiendo hidrolizarlos a compuestos orgánicos sencillos (carbohidratos, ácidos orgánicos o aminoácidos), incluso hasta estructuras más complejas (como la lignina o los ácidos húmicos).

Los microorganismos pueden utilizar cualquier compuesto de nitrógeno, desde las formas más reducidas como NH^{+4}, amina, amidas, nitrilos y aminoácidos, hasta las más oxidadas tales como óxidos de nitrógeno, nitritos y nitratos.[121]

3.2.4 Tiempo de retención o velocidad de carga orgánica. La velocidad de carga, o tiempo de retención hidráulica, es el tiempo promedio que tarda la materia orgánica en el biorreactor, lo cual está directamente relacionado con la temperatura, se recomienda que mientras la muestra permanezca en el biorreactor que éste esté bajo agitación porque los compuestos solubles y coloidales se degradan, los tiempos pueden variar entre 12 a 24 horas y este tiempo puede variar entre 15 o 30 días para la digestión mesofílica y entre 5 a 15 días para la digestión hemofílica.[122]

3.2.5 Tipo de sustrato. Sirve para predecir la comunidad de cultivo que se desarrollará en la cámara del biodigestor y el tamaño de cada grupo de organismos, por lo tanto si la diferencia entre el contenido DBO y DQO son muy grandes significa que hay una gran cantidad de componentes no biodegradables.

3.2.6 Inhibidores (inhibición y toxicidad). Este factor es importante en el proceso de biodigestión debido a que es uno de los factores que pueden impedir la reacción, sobre todo en el proceso de metanogénesis, determinados como inhibidores se encuentran:

- La acidificación a partir de acetato: ya que por tener exceso de sustrato inhibe la producción de metano porque excede su consumo.
- Alta presencia de amoniaco: la cantidad en exceso inhibe el PH y así afecta el C/N.
- Generación de dióxido de carbono: lo cual genera una disminución de la producción de metano[123]

---

[121] Ibid,p 134
[122] Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit., p.86
[123] HANSSON G., MOLIN. End Product Inhibition in Methane Fermentation: Effects of Carbon Dioxide and Methane on Methanogenic Bacteria Utilizing Accetare. Europcan J.Appl. Microbiol.Biotechnol, 1981. p. 236-247

3.2.7 Biogás. Para Hacer seguimiento a la generación de biogás se utilizan varios métodos, los métodos más comunes son el método volumétrico, el de indicador de combustión de gas, y el método por análisis cromatógrafo.
Este último método mencionado, usa la absorción y el desplazamiento de volumen, lo cual se hace utilizando una botella de mariotte, se utiliza una botella con agua que se utiliza para absorción (de gases como H_2S y CO_2) con el fin de determinar predominantemente el volumen de CH_4.[124]

3.2.8 pH. Esta variable nos ayuda a determinar la fase del proceso, identificando procesos de inhibición por exceso de ácidos grasos volátiles o de amonio, el pH óptimo para la operación del biodigestor estar entre 6.8 y 7.2 unidades de pH.[125]

3.2.9 Demanda química de oxigeno (DQO). Es la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada mediante un agente oxidante en una muestra líquida, a medida que se va llevando a cabo la reacción la cantidad de materia orgánica degradable disminuye.
Permite determinar la modificación en el caudal de recirculación de lixiviado, factor que aumenta la degradación del medio, si reduce el DQO soluble es un indicador de que está pasando un proceso de inhibición de algún tipo en el biodigestor.[126]

3.2.10 Solidos volátiles. Se define como el porcentaje o porción que tiene un determinado material, que es susceptible a ser biodegradado debido a que es el aumento en la materia soluble disponible para la flora microbiana.[127]

3.2.11 Relación inoculo-sustrato (I/S). Esta relación se debe mantener en un rango adecuado y sugieren no ser un valor menos de 0.2 y no superior a 6.0, esto genera un aumento significativo en el potencial bioquímico de metano.[128]

3.2.12 Relación carbono-nitrógeno (C/N). Es una relación de materiales de fermentación ya que en su mayoría están compuestos en su mayor parte de carbono (C) y nitrógeno (N) y siendo estas macro moléculas las más abundantes en el medio ambiente.[129]

---

[124] PACHECO. Op. Cit. p. 30
[125] BITTON, G. Wastewater Microbiology. Weley-Liss, New York, USA. 1994.
[126] PACHECO. Op. Cit. p 30
[127] PACHECO. Op. Cit. p 30
[128] PACHECO. Op. Cit. p 30
[129] Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op. Cit., p.35

En el proceso microbiológico, también deben estar presentes y en equilibrio sales minerales tales como el potasio, manganeso, hierro, zinc, selenio, azufre, fosforo y otros en menor proporción.[130]

3.2.13 Velocidad de reacción. La velocidad de reacción es una variable importante al realizar el diseño de un reactor de cualquier tipo, también influye al momento de extrapolar los resultados obtenidos en un montaje a escala y llevarlo a un montaje de tamaño industrial, en la presente investigación no se analizó a fondo el efecto de la cinética química; sin embargo, se realizó un planteamiento de la velocidad de reacción que puede ser usado para el análisis de datos a escala industrial.

Se seleccionó la fase metanogénica, en la cual se genera el producto a analizar (CH_4), para plantear la velocidad de reacción.

Las reacciones involucradas son[131]:

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

$$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$$

Para efectos del planteamiento, las anteriores se simplificaron como se muestra a continuación:

$$A + 4B \rightarrow C + 2D$$

$$E + D \rightarrow C + F$$

Donde:

A = CO_2
B = H_2
C = CH_4
D = H_2O
E = CH_3COO
F = HCO_3.

Ahora considerando que las especies se relacionan entre ellas, se aplica la ley de acción de masas:

$$\frac{r_i}{v_i} = \frac{r_A}{-1} = \frac{r_B}{-4} = \frac{r_C}{1} = \frac{r_D}{2}$$

[130] Ibid.p 36
[131] JIMÉNEZ, Diego de la Merced. Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana. 2012. p. 25

$$\frac{r_E}{-1} = \frac{r_D}{-1} = \frac{r_C}{1} = \frac{r_F}{1}$$

Y si conocemos la concentración inicial y final, de C podremos conocer la velocidad de reacción para las ecuaciones anteriormente planteadas así:

$$r_C = k_1 C_A {C_B}^4 + k_2 C_E C_D$$

Esto considerando una reacción de tipo elemental.

La ecuación anterior puede ser empleada para realizar una estimación de la velocidad de reacción, sin embargo, sería conveniente realizar un análisis más exacto de la misma.

3.3 SELECCIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Teniendo en cuenta el proceso de transformación de la materia orgánica en el biodigestor al compuesto gaseoso deseado, dándole así cumplimiento a los objetivos que anteriormente se planearon, se plantean parámetros y variables con las que, según literatura consultada, son las condiciones óptimas para el biorreactor.

3.3.1 Variables de operación. A partir de lo mencionado en la sección 3.2 se identificó como variable de operación para el biorreactor la cantidad de biomasa que ingresa al proceso de digestión, a continuación, se explica el por qué se seleccionó como variable controlada:

- **Cantidad de biomasa:** la presente investigación se realiza con el fin de realizar una propuesta de tratamiento de residuos orgánicos que se pueda aplicar a diferentes campos petroleros, al evaluar diferentes cantidades de biomasa se podrá hacer una aproximación de la posible generación eléctrica en función de la cantidad de residuos generados por cada campo.

3.3.2 Variables dependientes.

3.3.2.1 Temperatura. El proceso de digestión se llevará a cabo a temperatura ambiente puesto que elevar la temperatura del mismo conllevaría cierto grado de consumo energético y es importante tener en cuenta que el objetivo de este proceso es la generación y no el consumo de energía, sin embargo, debido a las reacciones que ocurren al interior del biodigestor se realizará un monitoreo diario de su temperatura

La temperatura ambiente en Bogotá puede oscilar entre los 8 y los 22 °C, no obstante, es importante resaltar que los campos petroleros en los que se

implementaría el biodigestor se encuentran principalmente en el departamento del Meta, donde presentan una temperatura máxima promedio de 34 °C y una temperatura mínima promedio de 23 °C.[132]Lo que favorecería la producción de metano disminuyendo los tiempos de retención.

3.3.2.2 pH. Como se mencionó en la sección 3.2.8 el pH, es una de las variables más importantes en el proceso de biodigestión ya que en ciertos rangos de pH se puede generar la inhibición de los microorganismos, realizar la medición directamente al interior del tanque es imposible puesto que éste se encuentra sellado herméticamente, sin embargo, se cuenta con un sistema de purga que permitirá monitorear el pH diariamente.

3.3.2.3 Demanda química de oxígeno (DQO). La demanda química de oxígeno se considera una variable dependiente puesto que el contenido de DQO al interior del tanque varía a medida que se va dando el proceso de degradación de materia orgánica, adicionalmente, a partir de ésta variable se puede determinar el volumen de biogás obtenido en el proceso, por tal motivo, se realiza la determinación de DQO al inicio y al final de cada ensayo.

3.3.3 Parámetros de operación

3.3.3.1 Humedad. La humedad está determinada por la cantidad de agua contenida en el residuo a tratar y teniendo en cuenta que éste ya cuenta con la suficiente hidratación (más del 50% de agua) se considera un parámetro idóneo para alimentar el biodigestor anaeróbico.

3.3.3.2 Tiempo de retención o velocidad de carga orgánica. Basado experiencia del director de tesis en un biorreactor desarrollado en campo; Se indica tiempos de retención sugeridos por la literatura y con sus respectivas temperaturas para el óptimo funcionamiento del biodigestor, el montaje se realizó a temperatura ambiente tardándose un ciclo completo 18 días.

3.3.3.3 Microorganismos. El pack de bacterias fue entregado por parte de Acipet e incluye tres tipos de bacterias: hidrolíticas, acetogénicas y metanogénicas.

De acuerdo a lo anterior, en la Tabla 15 se establecen los parámetros de operación para el proceso de digestión y en la Tabla 16 los valores que tomará la variable de operación.

---

[132]Weatherspark. El clima promedio en Puerto Gaitán [en línea], [revisado 25 noviembre 2018]. Disponible en internet: https://es.weatherspark.com/y/25246/Clima-promedio-en-Puerto-Gait%C3%A1n-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o

Tabla 15. Parámetros de operación

Parámetro	Condición
Humedad	58.38%
Tiempo de retención	18 días
Pack de bacterias	Hidrolíticas Acetogénicas Metanogénicas

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Diseño de experimentos

Factores	Niveles
Cantidad de biomasa	30 kg 40 kg 60 kg

Fuente: elaboración propia

Cabe aclarar que no se realizó un diseño de experimento debido a que únicamente tenemos un factor para variar, el cual es la masa ingresada, por lo cual se realizaron las tres corridas con masas diferentes, los valores fueron escogidos teniendo en cuenta la cantidad de biomasa disponible (150 Kg), la capacidad de almacenamiento de la tolva de alimentación y la cámara de digestión, junto con la necesidad de que las tres corridas iniciaran con diferentes cantidades de biomasa.

4. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DE UN BIORREACTOR A ESCALA LABORATORIO

En el capítulo se realiza una descripción acerca de cómo se realizó el montaje a escala laboratorio de un biorreactor, teniendo en cuenta materiales, proceso de construcción y puesta en marcha del mismo. El proceso de obtención de biogás se llevó a cabo teniendo en cuenta las variables y parámetros mencionados en el capítulo 3.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

Para realizar el montaje del biorreactor se tuvieron en cuenta ciertos factores considerados importantes para la económica generación de biogás, dichos factores fueron:

- Facilidad de operación.
- Disponibilidad de espacio para el montaje.
- Disponibilidad de materiales a emplear.
- Costo de los materiales a emplear.

A continuación se realizó un breve resumen de los materiales usados, en el Anexo D se detalla el procedimiento de construcción del biorreactor y en el Anexo E los costos de inversión para el montaje realizado.

4.1.1 Tolva de alimentación. Los únicos requisitos a la hora de seleccionar la tolva de alimentación, fueron no ser poroso y tener la capacidad suficiente para almacenar la biomasa antes de ser ingresada a la cámara de digestión, por lo cual se escogió un recipiente plástico de pintura (Figura 12) el cual se encontraba vacío. Las dimensiones son mostradas en la Tabla 17

Tabla 17 Dimensión tolva de alimentación

Capacidad (L)	Diámetro (cm)	Alto (cm)
19	30	35

Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Tolva de alimentación

Fuente: elaboración propia

4.1.2 Material de la cámara de digestión. Para seleccionar el material del biorreactor, se analizaron las características de los tanques que cumplieran con factores como rigidez, porosidad, hermeticidad, resistencia a cambio de pH y temperatura, sin embargo el factor determinante para realizar esta selección fue la disponibilidad en el mercado de un recipiente que cumpliera con estas características, por lo cual se seleccionó un bidón de polietileno de alta densidad y alto peso molecular (PEAD-APM).

El tanque de almacenamiento del biogás posee únicamente 2 orificios de un tamaño reducido en comparación con el tanque de biorreacción, los cuales serán útiles para algunas conexiones necesarias en el funcionamiento del biorreactor, permitiendo un alto grado de hermeticidad en el proceso estricto anaeróbico.

4.1.3 Dimensiones de la cámara de digestión. Comercialmente, los recipientes son clasificados de acuerdo a su capacidad en volumen, por tanto, las dimensiones del tanque elegido como cámara de digestión están sujetas a los estándares de fabricación de los mismos; en el mercado podemos encontrar bidones desde los 20 L hasta los 1500 L, e incluso algunos se pueden encontrar con chaqueta de calefacción. Teniendo en cuenta que el proyecto se realizó a escala laboratorio y su disponibilidad estaba sujeta al mercado local y el costo del mismo, se selección un bidón (Figura 13) con las dimensiones mostradas en la Tabla 18.

Tabla 18 Dimensiones del bidón seleccionado

Capacidad (L)	Diámetro (cm)	Alto (cm)
60	35	60

Fuente: elaboración propia

Figura 13. Cámara de digestión 2019

Fuente: elaboración propia

4.1.4 Dimensiones del almacenamiento del biogás. La selección del recipiente donde se almacenó el biogás se realizó teniendo en cuenta que este debía contar con las siguientes características:

- Ser inerte.
- No tener escapes.
- Resistente a la corrosión.
- Resistente a la contaminación.

Bajo dichas características, la elección fue un gasómetro (Figura 14) con las dimensiones que se muestran en la Tabla 19 y de igual manera son medidas estándares de fabricación sujetas al mercado local.

Tabla 19 Dimensiones del gasómetro seleccionado

Capacidad (L)	Largo (cm)	Alto (cm)	Ancho (cm)
30	27	50	24

Fuente: elaboración propia

Figura 14. Bidón escogido como gasómetro

Fuente: elaboración propia

4.1.5 Sistemas de conexión. La selección de los sistemas de conexión se realizó teniendo en cuenta que debía contar con las siguientes características:

- Resistente a la corrosión.
- Hermeticidad.
- Flexibilidad.

Bajo dichas características, la elección fue tubo de PVC para el transporte de biomasa y manguera plástica con aislamiento amarillo (Figura 15) para el transporte del biogás.

Figura 15. Manguera plástica con aislamiento amarillo

Fuente: elaboración propia

4.2 PUESTA EN MARCHA DEL BIORREACTOR

El montaje del biorreactor se realizó en una casa ubicada en el municipio de Cajicá Cundinamarca, en la Figura 16 puede observar el montaje terminado y listo para llevar a cabo el proceso de digestión; sin embargo, antes de cargar la biomasa en la tolva de alimentación se debe realizar una prueba de fugas que garantice la hermeticidad del biorreactor y como se estableció en la sección 3.3 se llevaran a cabo tres experimentos evaluando la cantidad de biomasa que ingresa al proceso. En el Anexo F se detalla el protocolo llevado a cabo para el proceso de digestión.

Figura 16. Montaje del biorreactor terminado

Fuente: elaboración propia

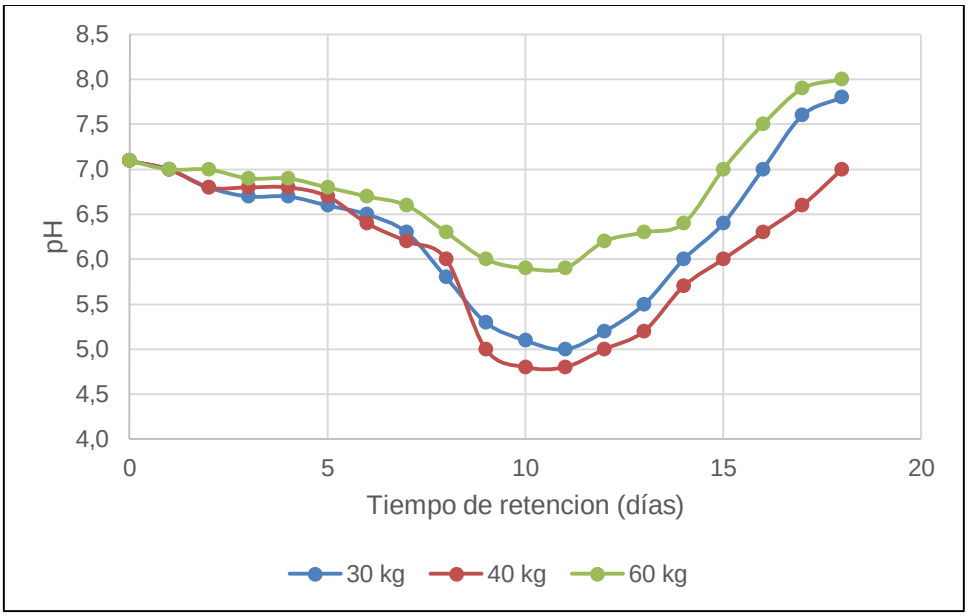
De acuerdo a lo mencionado en la sección 3.3.2 se llevó a cabo un monitoreo diario de las condiciones de operación del biorreactor, es decir, pH y temperatura, a continuación se realiza un análisis de lo observado durante los tiempos de puesta en marcha del biorreactor:

4.2.1 pH. Como se mencionó en la sección 3.2.8, para dar inicio al proceso de Biodigestión la biomasa debe encontrarse en un rango de pH entre 6.8 y 7.2, es decir, pH cercano a la neutralidad y en el proceso de caracterización encontramos que el residuo objeto de estudio posee un pH inicial de 7.096, es decir, que es óptimo para dar inicio al proceso, sin embargo, debido a la acción de los microorganismos éste valor puede modificarse de acuerdo a la acción de los mismos, de acuerdo con los datos bibliográficos el pH para la fase hidrolítica corresponde a 7.0-7.2, la acidogénica se encuentra entre 5.5 y 6.5 y para la fase metanogénica entre 7.8 y 8.2, siendo el pH neutro el ideal.[133]

[133] BITTON, G. Op. Cit.

Con el fin conocer en qué etapa de la digestión se encuentra el proceso y de asegurar que los microorganismos se encuentren en rangos de pH que no generen inhibición se realizó el monitoreo diario de pH, los datos obtenidos para dicho monitoreo se encuentran en el Anexo G y a continuación, en la Gráfica 4, puede observar el comportamiento del pH para cada uno de los ensayos realizados.

Gráfica 4. Comportamiento del pH a través del tiempo



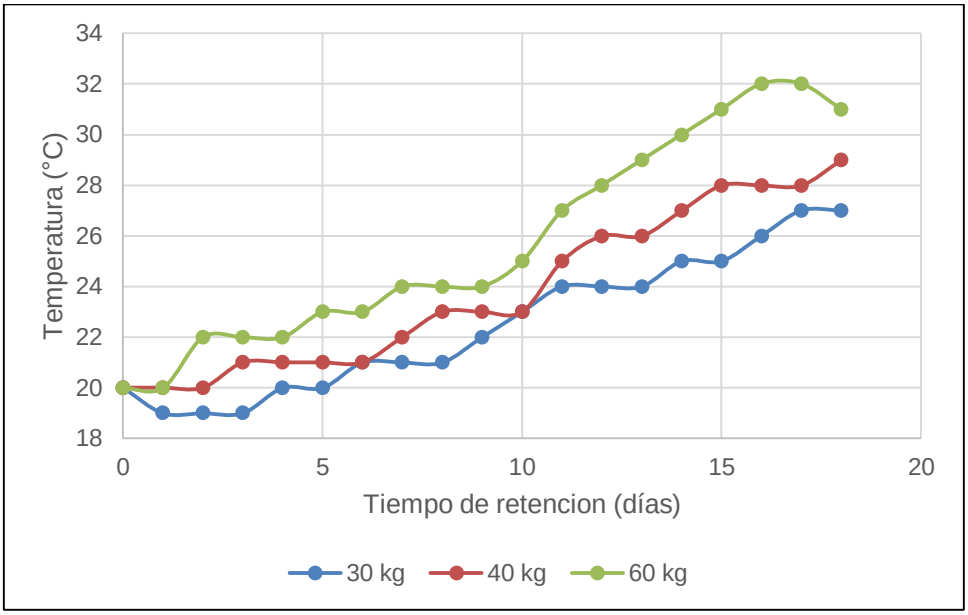
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con algunos estudios el pH en el interior del digestor también puede influir significativamente en la composición del biogás obtenido[134], si observamos la gráfica anterior y comparamos con los valores de pH para cada fase indicados por Bitton, observaremos que tanto el ensayo realizado con 30 kg como el realizado con 40 kg no se encuentran en el pH óptimo durante la fase acidogénica, por tanto, se espera menor calidad en el biogás obtenido en estos dos ensayos en comparación con el realizado con 60 kg de biomasa que sí se encuentra dentro de los rangos de pH óptimos para cada fase.

4.2.2 Temperatura. Al igual que se realizó el monitoreo de pH también se realizó el de la temperatura interna del biodigestor y los resultados obtenidos se muestran en el Anexo H, para observar mejor dichos resultados se realizó la construcción de la Gráfica 5, observe que la temperatura aumente a medida que avanza el proceso, esto quiere decir que las reacciones que se presentan al interior de la cámara de digestión entre los microorganismos y la biomasa son exotérmicas.

[134] MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. P 21.

Gráfica 5. Comportamiento de la temperatura al interior de la cámara de digestión a través del tiempo



Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de la temperatura en cada ensayo se encuentra dentro del rango de los microorganismos Mesófilos que mencionamos en la sección 3.2.1, es decir, entre 10 y 40 °C; teniendo en cuenta que a mayor temperatura mayor será la eficiencia de la actividad microbiana se espera que haya una mayor degradación en el ensayo realizado con 60 kg de biomasa.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGAS

En este capítulo se determinan los resultados obtenidos después de haber puesto en marcha el biorreactor, se calculó la capacidad calorífica del biogás de manera analítica a través de ecuaciones que tienen en cuenta cantidad de CH_4 y cantidad de biogás generado durante la prueba experimental; gracias a la capacidad calorífica se procedió a encontrar el potencial energético del biogás lo cual brinda información suficiente para conocer el alcance que podría tener el biogás como fuente energética para ciertos aparatos eléctricos. Por último la creación de una matriz donde se tuvieron en cuenta los parámetros más importantes para la implementación de un biorreactor en un campo petrolero

5.1 DETERMINACIÓN DQO DEL SUSTRATO FINAL

De acuerdo a lo mencionado en la sección 2.2.5 se realizó la determinación de la DQO en el sustrato final (Figura 17), para ello se usó la curva de calibración presentada en la Gráfica 3 teniendo en cuenta que las absorbancias obtenidas para los ensayos realizados con 30 kg, 40 kg y 60 kg fueron de 0.163, 0.145 y 0.113 respectivamente.

Figura 17. Determinación DQO al sustrato final

Fuente: elaboración propia

Al igual que para el residuo inicial, la DQO del sustrato se calculó a partir de las ecuaciones 5 y 6, una vez conocidos éstos resultados se procedió a calcular el porcentaje de remoción de DQO a partir de la siguiente ecuación[135]:

[135] CARTAGENA ARÉVALO, Julián Camilo y MALO MALO, Brian Orlando. Evaluación del uso de la microalga *Chlorella vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR el salitre a nivel laboratorio. Tesis. Fundación Universidad de América. Bogotá D.C., 2017. p.58

Ecuación 7. Porcentaje de remoción de DQO

$$\%\,Remoción\,DQO = \frac{DQO_{entrada} - DQO_{salida}}{DQO_{entrada}} \times 100\%$$

Fuente: CARTAGENA ARÉVALO, Julián Camilo y MALO MALO, Brian Orlando. Evaluación del uso de la microalga *Chlorella vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR el salitre a nivel laboratorio. Tesis. Fundación Universidad de América. Bogotá D.C., 2017.

A continuación, se realiza una muestra de cálculos para el ensayo realizado con 30 kg de biomasa cuyo sustrato tiene 389.5 mg/L de DQO:

$$\%\,Remoción\,DQO = \frac{1273.25\frac{mg}{L} - 389.50\frac{mg}{L}}{1273.25\frac{mg}{L}} \times 100\% = 69.41\%$$

En el Anexo I podrá encontrar una muestra de los cálculos que llevaron a la obtención de los resultados que se muestran a continuación en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados DQO del sustrato final

Biomasa inicial (kg)	**Absorbancia**	**DQO (mg/L)**	**% Remoción DQO**
30	0.163	389.5	69.41%
40	0.145	344.5	72.94%
60	0.113	264.5	79.23%

Fuente: elaboración propia

Observe que a medida que aumenta la biomasa inicial también aumenta la remoción de DQO y según lo mencionado en la sección 2.2.5 esto se encuentra directamente relacionado con la producción de biogás teniendo en cuenta que 1 kg de DQO eliminada produce 350 L de metano;[136] de acuerdo a esto se espera mayor obtención de metano para el ensayo realizado con 60 kg de biomasa inicial.

5.2 ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA DE GASES

Se realizó un análisis de cromatografía de gases al biogás obtenido usando un cromatógrafo marca HP modelo 5890 programado a 100° C y usando Helio como gas de arrastre, los resultados obtenidos por el programa se muestran en el Anexo

[136] PEREZ. Op. Cit. p.31

J y a continuación, en la Tabla 21 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para el porcentaje de metano que posee cada muestra.

Tabla 21. Calidad del biogás obtenido

Biomasa inicial (kg)	% CH_4
30	64.9
40	62.7
60	67.6

Fuente: elaboración propia

Se puede observar que la calidad del biogás no está relacionada con la cantidad de biomasa que ingresa al sistema sin embargo, en la sección 4.2.1 se había mencionado que el pH en el interior de la cámara de digestión podía influir significativamente en la composición del biogás obtenido, esto se puede confirmar puesto que el biogás que obtuvo la menor calidad (62.7%) corresponde al obtenido en el ensayo realizado con 40 kg de biomasa y fue justo en éste ensayo donde el pH en la fase acidogénica disminuyó hasta 4.8.

5.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Se realizó la cuantificación de la producción de biogás a partir de los resultados obtenidos para las DQO inicial y final, en el Anexo K se realizó una muestra de cálculos para la determinación del biogás producido en cada ensayo y a continuación, en la Tabla 22 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

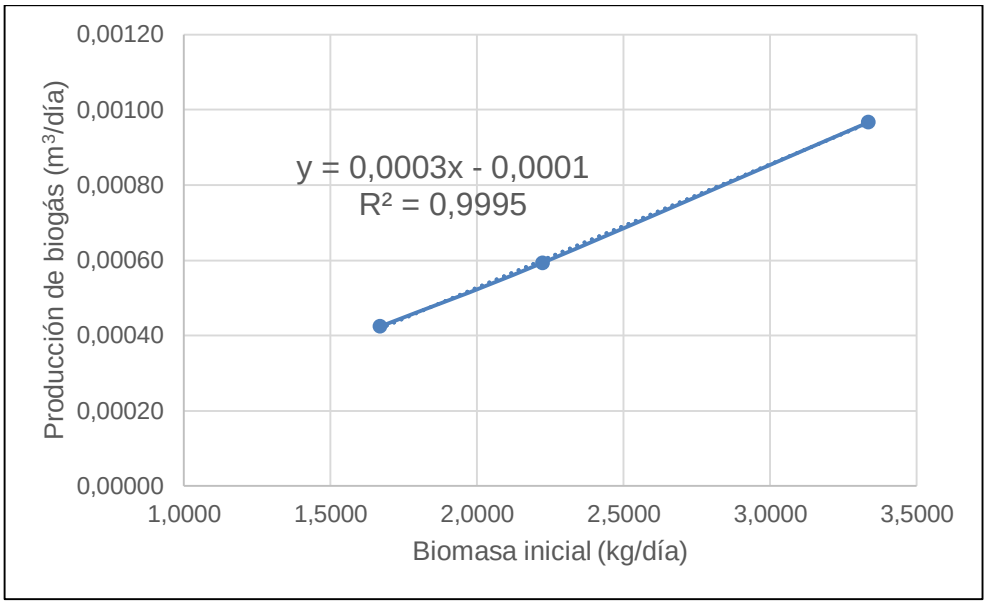
Tabla 22. Calidad del biogás obtenido

Biomasa inicial (kg)	Biomasa inicial (kg/día)	Producción de biogás (m^3/día)
30	1.6667	0.00042
40	2.2222	0.00059
60	3.3333	0.00097

Fuente: elaboración propia

Se observa una relación directa entre la cantidad de biomasa que ingresa al sistema y la producción de biogás, por tanto se decidió realizar la Gráfica 6 donde se muestra la tendencia de los resultados.

Gráfica 6. Relación directa entre la biomasa inicial y la producción de biogás



Fuente: elaboración propia

Se puede observar que al graficar la biomasa inicial vs la producción de biogás se obtiene una línea recta con un factor de correlación lineal de 0.9995, esto quiere decir que la ecuación de la recta puede ser usada para predecir la producción de biogás con cargas mayores de biomasa.

A continuación se realiza una predicción de la cantidad de biogás que podría producir diariamente Campo Rubiales considerando que éste genera 3825 kg diarios de residuos orgánicos, para ello usamos la Ecuación 8 que corresponde a la ecuación de la recta obtenida en la Gráfica 6.

Ecuación 8. Producción diaria de biogás.

$$Producción\ de\ biogás = \left(0.0003 \times Biomasa\ inicial \left[\frac{kg}{día}\right]\right) - 0.0001 \ \left[\frac{m^3}{día}\right]$$

Reemplazando:

$$Producción\ de\ biogás = \left(0.0003 \times 3825\ \frac{kg}{día}\right) - 0.0001 = \ 1.1474 \frac{m^3}{día}$$

Se determina que si campo rubiales aprovechara sus residuos orgánicos en procesos de biodigestión podría obtener aproximadamente 1.1474 m3/día de biogás, a continuación, se realiza un análisis energético de la posible producción de energía para Campo Rubiales.

5.4 CAPACIDAD CALORÍFICA SEGÚN COMPOSICIÓN

Para poder realizar un análisis de la energía que puede llegar a aportar el biogás como fuente energética renovable no convencional, es necesario conocer la capacidad calorífica; se utilizó la ecuación 9[137] para poder encontrar el poder calorífico. Solo se analizó la capacidad calorífica del metano debido a que es el componente principal que actúa como combustible dentro de la composición del biogás, por lo cual el valor energético del mismo será determinado por la cantidad de metano presente.
Se debe tener claro que los compuestos del biogás diferentes al metano no serán tenidos en cuenta para realizar los cálculos energéticos, debido a que la presente investigación no contempla la limpieza del biogás por sus altos costos y nula viabilidad basados en las características del proyecto.

Ecuación 9 Poder calorífico del biogás

$$P_{cg} = P_c(CH_4) * X_{CH4}$$

Fuente: RAMIREZ Cesar, PARRA Yaneth, ZARATE Ángela, MORENO Cristhian. Ingeniería básica para el proceso de generación de biogás, a partir de porquinaza. En: Revista publicaciones e investigación. Agosto, 2010. Vol. 4, p. 93-110.

Donde:

P_{cg}= Poder calorífico del biogás (Kcal/m^3)
$Pc\ (CH_4)$= Poder calorífico del metano (Kcal/m^3)
X_{CH4}= Fracción de metano

Calórico del metano es de 8.600 Kcal/m^3[138], el desarrollo de la ecuación es el siguiente:

$$P_{cg} = 8600\ \frac{Kcal}{m^3} * 0.676$$

[137] RAMIREZ. Op. Cit. p. 104
[138] PAREDES Raúl, BACA Marcos. Generación de energía con biogás de residuos agrícolas en plantas agroindustriales La Libertad – Perú. En: Third LACCEI International and Caribbean for Engineering and Technolgy. Junio, 2005. p. 1-16

$$P_{cg} = 5813.6\ \frac{Kcal}{m^3}$$

Basados en los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el biorreactor, se conoce que la que prueba que brindo mejor resultado fue la prueba 3 donde con mayor volumen de biomasa se obtuvo una mayor cantidad de biogás, por lo cual para muestras de cálculos solo se tomaron en cuenta dichos resultados de la prueba 3, los resultados de las 3 pruebas se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23 Resultados calculo poder calorífico del biogás

Prueba	**Poder calorífico del biogás**	**Promedio**	**Desviación estándar**
30 Kg	$5581.4\frac{Kcal}{m^3}$		
40 Kg	$5392.2\frac{Kcal}{m^3}$	$5595.7\ \frac{Kcal}{m^3}$	172.3
60 Kg	$5813.6\ \frac{Kcal}{m^3}$		

Fuente: elaboración propia

Ahora con el poder calorífico de biogás encontrado, se puede calcular el potencial de generación de energía del biogás, la Ecuación 10[139] es la usada para dicho cálculo.

Ecuación 10 Potencial de generación de energía del biogás.

$$P_{GE} = F_B * P_{cg}$$

Fuente: RAMIREZ Cesar, PARRA Yaneth, ZARATE Ángela, MORENO Cristhian. Ingeniería básica para el proceso de generación de biogás, a partir de porquinaza. En: Revista publicaciones e investigación. Agosto, 2010. Vol. 4, p. 93-110.

Donde:

P_{GE}= Potencial de generación de energía de biogás (Kcal/día)
F_b= Flujo de biogás (m^3/día)
P_{cg}= Poder calorífico del biogás (Kcal/m^3)

[139] RAMIREZ. Op. Cit. p. 105

5.5 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DEL BIOGÁS

Al conocer el flujo de biogás que llega a tener Campo Rubiales diario y con el promedio del poder calorífico obtenido en los cálculos inmediatamente anteriores, podemos conocer el potencial de generación de energía en dicho campo.

El resultado es el siguiente:

$$P_{GE} = 1.1474 \frac{m^3}{dia} * 5595.7 \frac{Kcal}{m^3}$$

$$P_{GE} = 6420.5 \frac{Kcal}{dia}$$

Conociendo el potencial de generación de energía de biogás en unidades Kcal/día, se debe realizar la conversión de unidades a Kwh, unidad de potencia con la que se mide comúnmente la energía eléctrica para consumo doméstico e industrial, con el fin de realizar una comparación con electrodomésticos de uso cotidiano; Se hizo el cambio de días a horas y de Kcal a KW la conversión de realizo como se muestra a continuación:

$$6420.5 \frac{Kcal}{dia} * \frac{1\ dia}{24\ horas} = 267.52 \frac{Kcal}{horas} * 1.17\ x\ 10^{-6} = 0.311126\ kW * 24\ horas = 7.467024\ kWh$$

5.5.1 Posibles usos del potencial de generación de energía del biogás. El valor obtenido de potencial de generación de energía del biogás es de 7,467 kWh bajo las condiciones de un volumen producido de biomasa en un campo como Campo Rubiales; dicho potencial es muy bajo para llegar a alimentar un equipo propio de las actividades de perforación, producción y transporte de hidrocarburos, por lo cual se enfocó en alimentar equipos más pequeños utilizados para las activadas básicas del ser humano en un campo petrolero.

En la Tabla 24[140] se muestran los equipos que posiblemente se encuentren en un campo petrolero.

[140] EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. Uso inteligente de la energía eléctrica
Banco de recomendaciones. EPM [en línea], marzo de 2012 [revisado 11 abril 2019]. Disponible en Internet:
https://www.epm.com.co/site/portals/2/documentos/banco_de_recomendaciones_uso_inteligente_energia_electricamarzo_27.pdf

Tabla 24 Consumo eléctrico equipos en un campo petrolero

Equipos	Consumo en Kwh mes
Bombillo 100 vatios	12
Bombillo 60 vatios	7,2
Bombillo ahorrador 25 vatios	3
Bombillo ahorrador 15 vatios	1,8
Bombillo LED	0,84
Ducha eléctrica	10,5
Horno estufa	3,3
Cafetera	9
Televisor LCD de 20 pulgadas	27
Horno microondas	10
Equipo de sonido	9
Computador de mesa	8,4
Computador portátil	7,2
Videojuegos	4,32
Radio	1,8
Reloj digital	1,44
Cargador con celular conectado	0,192
Cargador sin celular conectado	0,08
Nevera	54
Ventilador	36
Lavadora	9

Fuente: EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. Uso inteligente de la energía eléctrica Banco de recomendaciones. EPM [en línea], marzo de 2012 [revisado 11 abril 2019]. Disponible en Internet: https://www.epm.com.co/site/portals/2/documentos/banco_de_recomendaciones_uso_inteligente_energia_electricamarzo_27.pdf

Teniendo en cuenta la generación calculada, se podrían alimentar al mes un bombillo de 60 vatios, dos bombillos ahorradores de 25 vatios, cuatro bombillos ahorradores de 15 vatios, ocho bombillos LED, dos horno estufa, un computador portátil, un videojuego, cuatro radios, cinco relojes digitales, treinta y ocho cargadores con celulares conectados y noventa y tres cargadores sin celulares conectados.

5.6 MATRIZ DE EVALUACIÓN DE FACTORES INTERNOS DEL MONTAJE DE UN BIORREACTOR EN UN CAMPO PETROLERO

Se decidió tomar una matriz de evaluación de factores internos (MEFI), debido a que es un indicador que muestra la viabilidad de la implementación de algún proyecto evaluando las fortalezas y debilidades que presente en su montaje, puesta en marcha y funcionamiento.[141]

En la matriz (Cuadro 8) se muestran 14 características a tener en cuenta como fortalezas (F) y debilidades (D), cada una con su respectiva calificación en números de 1 a 4, siendo 1 debilidad importante, 2 debilidad menor, 3 fortaleza menor y 4 fortaleza importante.
Se realiza una ponderación para cada característica para conseguir un valor total ponderado el cual es el indicador para conocer la viabilidad del proyecto. En caso de que el valor total ponderado indique un valor menor a 2.5 se evidenciaría que posee debilidades que no harían posible la viabilidad del proyecto, en caso de que sea mayor a 2.5 indicaría un proyecto con buena viabilidad para su implementación.

Cuadro 8. Matriz de avaluación de factores internos

	Factores		**Calificación**	**Ponderación**	**Valor total ponderado**
1	Capacidad de procesamiento de materia orgánica	F	3	0.107143	0.321429
2	Materia orgánica se debe acondicionar antes de ser ingresada al biorreactor	D	2	0.071429	0.142857
3	Falta de capacidad de tratamiento del biogás	D	1	0.035714	0.035714
4	Poco interés de las empresas por implementar un biorreactor	D	1	0.035714	0.035714
5	Alternativa para un procesamiento adecuado de residuos orgánicos	F	3	0.107143	0.321429
6	Tasa de retorno de la inversión a largo plazo	D	1	0.035714	0.035714
7	Mitigación de costos energéticos del campo muy baja	D	1	0.035714	0.035714

[141] SHUM, Yi Ming. Matriz de evaluación de factores internos. Yi Min Shum Xie [en linea], 06 de febrero 2018 [revisado 14 mayo 2019]. Disponible en Internet: https://yiminshum.com/matriz-evaluacion-factores-internos-mefi/

Cuadro 8. Matriz de evaluación de factores internos (Continuación)

	Factores		Calificación	Ponderación	Valor total ponderado
8	Generación de biogás como fuente energética	F	3	0.107143	0.321429
9	Suministro constante de biomasa	F	3	0.107143	0.321429
10	Generación de biol como biorremediador de suelos erosionados	F	3	0.107143	0.321429
11	Cumplimiento de normas ambientales	F	3	0.107143	0.321429
12	Se requiere gran área para el montaje	D	1	0.035714	0.035714
13	Dificultad para convertir la biomasa en energía eléctrica	D	1	0.035714	0.035714
14	Dificultad de instalación en lugares de difícil acceso	D	2	0.071429	0.142857
Desempeño			28	1	2.428571

Fuente: elaboración propia

La ponderación del resultado de esta matriz fue del 2.43 lo cual quiere decir que las características de la implementación y biorreactor hasta el momento no son adecuadas y por lo tanto no cubren con las necesidades para la implementación de un biorreactor, sin embargo, ya que no sobrepasa por muy poco el uso favorable de estrategias que es de 2,5, por lo cual se deben generar estrategias para reducir las debilidades y tener un mejor aprovechamiento de las fortalezas y recursos para tener un mejor resultado.

Con la MEFI se determinó que seis factores son debilidades importantes, las cuales son casi la mitad de los factores analizados y tres de ellos giran en torno a la energía que puede llegar a aportar, por lo cual generando los ajustes y desarrollos necesarios, sería posible convertir dichas debilidades importantes en debilidades menores lo que conllevaría a aumentar la viabilidad del proyecto.

6. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

En el presente capítulo se evaluó financieramente la posible implementación de un biodigestor anaeróbico, teniendo en cuenta los costos operativos (OPEX), gastos de inversión (CAPEX) y múltiples factores que afectan en la toma de decisiones monetarias para la viabilidad del proyecto, se considera los beneficios otorgados por la ley 1715 de 2014 y se tendrán como referencia el valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR) como modelo de evaluación.

6.1 FACTORES A TENER EN CUENTA PARA LOGRAR EL OBJETIVO FINACIERO

Para lograr tener un proyecto de biogás exitoso se deben asegurar o apoyar los siguientes puntos:

6.1.1 Tarifas y costos energéticos. Estos dos factores deben ser estables y proyectarse a largo plazo para la evaluación del proyecto, así los ahorros y posibles ventas de energía pueden ser estimados de manera confiable.

6.1.2 Disponibilidad del sustrato y contratos asociados. Tener disponibilidad del residuo es uno de los parámetros más importantes a considerar, ya que sin residuo no habría producción energética, ésta sería inestable e incluso inexistente; es necesario asegurar el suministro.

6.1.3 Eficiencia de la conversión energética. La importancia de utilizar la tecnología eficientemente y seleccionar en cada proceso. Se desea siempre la mayor eficiencia de conversión de la energía que por sobre los otros sistemas de solo generación eléctrica, es importante elegir adecuadamente las tecnologías de generación requeridas de energía involucradas o para la venta de esta.

6.1.4 Ingresos extras por tratamiento de desecho a tercero y venta de abono. Para los proyectos de producción de biogás para la generación de energía, es necesario considerar todos los posibles ingresos.
Se puede aprovechar luego del proceso de la generación del gas, el sólido y liquido restante utilizarse en el mismo campo o vendiéndolos como abono, si no cumple con las condiciones sanitarias, se puede realizar tratamiento mecánico y biológico, para filtros de compostaje.

6.1.5 Impacto ambiental. Uno de los principales objetivos es generar para la industria petrolera un impacto positivo en el medio ambiente, cumpliendo toda la normativa establecida y las óptimas prácticas.
Reduciendo la emisión de metano al medio o la combustión de residuos para evitar la ventilación de gases de efecto invernadero

6.1.6 Financiamiento, subsidios y apoyo de gobierno local. El financiamiento externo con bajas tasas de interés y subsidios permiten mejorar los flujos de caja de los proyectos y por lo tanto su rentabilidad.
El apoyo del estado se hace fundamental para estos proyectos con el uso de energía no convencional (FNCE) ya que por la ley 1715 genera competitividad con respecto a la generación de energía tradicional.

El presente proyecto está enfocado en la generación de biogás a partir de residuos, mediante la alimentación de un biodigestor, los posibles riesgos a los cuales se debe estudiar el riesgo ambiental la principal problemática en las plantas de biodigestión es los olores, la disposición de los lixiviados generados después de la digestión, la ventilación de contaminantes atmosféricos y el ruido.
Estos efectos se pueden mitigar si se realiza un correcto diseño y operación de procesos como se menciona en capítulo de procesos elaboración de biorreactor.
Según la norma sanitaria no debe haber ninguna fuga de ni perdida descontrolada de lixiviado, manteniendo siempre cerrado hermético el sistema por último se debe controlar fugas de gas y el aprovechamiento de todo el gas no ventilando el gas metano ya que genera grandes impactos sobre la atmosfera por lo que es un gas de invernadero.

En nuestro país desde el 2014 se ha venido incentivando el uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE) con la implementación de la ley 1715 la cual genera beneficios tributarios a las empresas interesadas en generar energías limpias convenio generado en el ministerio de minas y la unidad de planeación minero energética (UPME) tales como:

- **Artículo 11 de la Ley 1715 de 2014:** Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta. Los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión para la producción y utilización de energía a partir FNCE o gestión eficiente de la energía, tendrán derecho a deducir hasta el 50% del valor de las inversiones.

- **Artículo 14 de la Ley 1715 de 2014:** Depreciación acelerada. Gasto que la ley permite que sea deducible al momento de declarar el impuesto sobre la renta, por una proporción del valor del activo que no puede superar el 20% anual.

- **Artículo 12 de la Ley 1715 de 2014:** Exclusión de bienes y servicios de IVA. Por la compra de bienes y servicios, equipos, maquinaria, elementos y/o servicios nacionales o importados.
- **Artículo 13 de la Ley 1715 de 2014:** Exención de gravámenes arancelarios. Los beneficios otorgados por el gobierno colombiano serán nombrados en este

capítulo financiero al momento de evaluar la factibilidad que tiene el proyecto determinando el CAPEX y OPEX.

El fin de la ley 1715 es generar aumento en la demanda de energía eléctrica así atacando a dos problemáticas que tiene la industria petrolera y en general el país, con el aumento de la demanda se disminuyen los costos de la factura eléctrica ya que en los anteriores casos de estudio en la industria petrolera los costos asociados a energía eléctrica es muy alta anualmente, y el otro enfoque que se le quiere dar al proyecto es el beneficio ambiental que trae a nuestro entorno, reduciendo así la emisión de metano a la atmosfera y la reutilización de materia orgánica que se está desperdiciando y solo desechando.

Por la falta de control en los entes reglamentarios hay mucho desconocimiento de estos beneficios que otorga el gobierno, las instituciones encargadas de velar por estos proyectos de energía renovables son el ministerio de minas y energía, y la unidad de planeación minero energética.

6.2 COSTOS INVERSION (CAPEX)

Las inversiones en bienes de capitales (CAPEX) para el proyecto de biogás corresponden a los costos primarios de los equipos; para el presente proyecto se logró obtener la totalidad de los componentes junto con el costo del biodigestor a escala laboratorio, el costo es el descrito en el Anexo E, en dicho anexo se estima el valor unitario del proyecto, calculando el valor total sobre el biodigestor realizado a escala laboratorio.

Ahora bien, para poder realizar el análisis financiero de la implementación del equipo en un campo petrolero se deben analizar los costos aproximados que conllevarían la construcción de un reactor que permita tratar la cantidad de residuos generados en campo, éste análisis se realiza a continuación en la Tabla 25.

Tabla 25. Costos biorreactor a escala industrial

Cantidad	Elemento	Costo unitario	Costo total
	Preliminares		
1	Herramientas	$ 505,000	$ 505,000
1	Seguridad industrial	$ 505,000	$ 505,000
70	Replanteo	$ 2,500	$ 175,000
20	Excavación	$ 110,000	$ 2,200,000
	Biodigestor gasómetro		
60	Concreto 3500 impermeabilizado	$ 52,200	$ 3,132,000
15	Hierro 1/2 (L=12M)	$ 90,000	$ 1,350,000
1	Tapa biodigestor	$ 1,500,000	$ 1,500,000
	Reservorio biol		
20	Concreto 3500 impermeabilizado	$ 90,000	$ 1,800,000
5	Hierro 1/2 (L=12M)	$ 1,500,000	$ 7,500,000
	sistema de desagüe		
20	Instalación y suministro tubería PVC 3"	$ 22,900	$ 458,000
1	Planta eléctrica o grupo electrógeno	$ 5,650,000	
1	Piloto laboratorio	$ 562,600	$ 562,600
	Inversión diferida		$ 10,000,000
	Total		$ 29,687,600

Fuente: elaboración propia

6.3 COSTOS OPERACIONALES (OPEX)

Los costos operacionales están en el orden de los $81’235.000; en nuestro caso el desecho a utilizar no genera costo de materia prima sin embargo, según los antecedentes de literatura y con asesoría del director, se logró realizar los siguientes costos operativos con dos propuestas que se pueden observar en los Cuadros 9 y 10.

Cuadro 9. Propuesta 1

Valor anual operación		$ 81,235,000	$ 87,615,000	$ 97,405,000
	Kg Día	2500	2500-3000	3000-4000
	Kg Mes	75000	90000	120000
		$ 1,083.1	$ 973.5	$ 811.7
Alcance:	Incluye personal HSEQ, logística de recepción y Tratamiento Biol y Biodigestor			
personal Requerido:	2			
NOTA: Precio no incluye IVA. Valores en pesos colombianos (COL$). No incluye cálculo de gastos laborales por acuerdos o convenciones laborales. No incluyen gastos por transporte, hospedaje y alimentación del personaje requerido				

Fuente: CASTRO P, Mario A. PRESENTACIÓN COMERCIAL BIOTECH V4. BIOTECH [en línea], 14 de Febrero de 2017 [revisado 18 mayo 2019]. p 15, modificado por los autores, Disponible en Internet: https://connectamericas.com/sites/default/files/company_files/PRESENTACI%C3%93N%20COMERCIAL%20BIOTECH%20V4%2014-02-2017.pdf

Cuadro 10. Propuesta 2

Valor anual operación		$ 126,995,000	$ 138,215,000	$ 152,405,000
	Kg Día	2500	2500-3000	3000-4000
	Kg Mes	75000	90000	120000
		$ 1,693.3	$ 1,535.7	$ 1,270.0
Alcance:	Incluye personal HSEQ, incluye manejo de recolección en punto de acopio y disposición completo. Tratamiento Biol y Biodigestor			
Personal Requerido:	2			
NOTA: precio no incluye IVA. Valores en pesos colombianos (COL$). No incluye cálculo de gastos laborales por acuerdos o convenciones laborales. No incluyen gastos por transporte, hospedaje y alimentación del personaje requerido				

Fuente: CASTRO P, Mario A. PRESENTACIÓN COMERCIAL BIOTECH V4. BIOTECH [en línea], 14 de Febrero de 2017 [revisado 18 mayo 2019]. p 15, modificado por los autores, Disponible en Internet: https://connectamericas.com/sites/default/files/company_files/PRESENTACI%C3%93N%20COMERCIAL%20BIOTECH%20V4%2014-02-2017.pdf

6.4 EVALUACION ECONOMICA

6.4.1 Flujo de caja. Se generó la evaluación del proyecto anualmente sumando la producción diaria biogás y el biol generado con una base de alimentación del biorreactor de 3825 kg de materia orgánica.

Se obtuvo flujos de caja operativos negativos hasta los primeros 20 años del proyecto visualizados en el Anexo L lo que significa que generando grandes inversiones de dinero, no empezarían a generar utilidades después de 240 meses, la empresa no maneja ninguna tasa de oportunidad ni retorno por lo que se utilizó una representativa del 9% que es una tasa que encontramos fija en entidades financiera y que el riesgo es nula

6.4.2 Valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno u oportunidad (TIR o TIO). El proyecto evaluado no es rentable, se proyecta a 21 años hasta que alcanza el flujo de caja positivo, pero si verificamos la Tabla 26, lo que representa un valor de VPN de -$406.390.018 es que las pérdidas ocasionadas o que se van a generar durante el tiempo llevadas a valor presente no hace viable el proyecto sería un gasto la implementación del biorreactor y como recomendación evaluar costos de disposición de residuos generados y que en este caso la empresa si podría representar un ahorro.

Tabla 26. Resumen financiero

Análisis financiero	Costo
CAPEX	$ 29,687,600
OPEX	$ 81,235,000
VPN	-$ 406,390,018
TIR	No genera una tasa positiva
TASA UTILIZADA	9%

Fuente: elaboración propia

7. CONCLUSIONES

- Se identificó por medio de la caracterización que en Campo Rubiales se produce aproximadamente 3825 kg/día de residuos orgánicos que pueden ser aprovechados mediante procesos de digestión anaeróbica puesto que al observar sus características físico-químicas tales como temperatura, pH, densidad , humedad, contenido de materia orgánica y DQO.

- Se encontró que el residuo posee características óptimas para ser usado como biomasa con humedad del 58.38%, contenido de materia orgánica del 97.41% y 1273.25 mg/L de DQO que pueden ser oxidados por medios químicos para la producción de biogás.

- De acuerdo al análisis realizado de las variables involucradas en el proceso de digestión se seleccionó la cantidad de biomasa como variable de operación con el fin de realizar una propuesta de tratamiento de residuos orgánicos que se pueda aplicar a diferentes campos petroleros haciendo una aproximación de la posible generación eléctrica en función de la cantidad de residuos generados por el campo, adicionalmente se encontró que se deben monitorear las variables dependientes (Temperatura, pH y DQO) con el fin de realizar un proceso óptimo para la producción de biogás.

- Considerando las variables y parámetros descritos se estableció realizar el montaje para un reactor UASB pues éste posee ciertas ventajas como los bajos costos de operación, facilidad de manejo, permite el manejo de altas cargas intermitentes, entre otras.

- El montaje del biorreactor se realizó usando bidones de polietileno de alta densidad y alto peso molecular (PEAD-APM), un termómetro que permitiera medir la temperatura interna de la cámara de digestión, un sistema de purga para realizar la medición del pH y un manómetro que permitiera verificar el paso de biogás al gasómetro.

- La fase experimental permitió determinar que la cantidad de residuo que ingresa al sistema influye directamente en la cantidad de biogás producido, obteniéndose la mayor producción de biogás () para el ensayo realizado con 60 kg de biomasa, sin embargo, la calidad del mismo no se ve influenciada por la cantidad de residuo sino por otros factores como el pH y la temperatura que de no ser controlados adecuadamente pueden inhibir la reacción de biodigestión, éste fue el caso del ensayo realizado con 40 kg donde se presentó una diminución de pH hasta 4.8 y se obtuvo una menor calidad del gas (62.7 % CH_4) en comparación con los ensayos realizados con 30 kg (64.9 % CH_4) y 60 kg (67.6% CH_4).

- El análisis energético del biogás por medio analítico no brindo resultados satisfactorios al momento de investigar que necesidades eléctricas puede llegar a suplir en un campo petrolero, debido al alto consumo energético de las herramientas inherentes a la activad de exploración, perforación y producción, por lo cual solo es posible alimentar satisfactoriamente elementos de consumo eléctrico menor utilizados por actividades humanas diferentes a la antes mencionadas.

- Al analizar la matriz se determina la no viabilidad de la implementación de un biorreactor en un campo petróleo donde se analizaron únicamente los factor de generación eléctrica del biogás y económica debido a que no es justificable la inversión y periodo de retorno de la inversión

- De acuerdo al análisis financiero realizado se logró determinar que la implementación de biorreactor como fuente de energía renovable no es viable, esto debido a que durante un periodo de 20 años carece de utilidades, enfatizando que el gobierno colombiano más concretamente la unidad de planeación minero energética (UPME) genera unos beneficios que disminuyen los costos de inversión (CAPEX) con un total $29.687.600 y gastos operacionales (OPEX) de $81.235.000. Adicionalmente, tomando como criterio de evolución el valor presente neto (VPN) con resultado negativo de -$ 406.390.019 lo que representa una mayor gasto de dinero en los siguientes años, sin retorno de capital.

8. RECOMENDACIONES

- Incluir en la caracterización del residuo la relación C/N para garantizar que la actividad microbiana sea óptima y evitar la producción de malos olores, en caso que la relación sea inferior a 30/1 se recomienda añadir a la mezcla material rico en carbono como hojas secas, ramas, entre otros; y en caso que sea superior a 30/1 añadir material rico en nitrógeno como estiércol o residuos crudos de cocina.

- Se recomienda realizar una investigación alterna donde se implementen otras packs de bacterias y se evalúe la implementación de un sistema de calefacción analizando beneficios (como posible diminución en los tiempos de retención debido al aumento en la actividad de los microorganismos) y costos de producción.

- Evaluar la implementación de un sistema de limpieza de biogás para mejorar su calidad eliminando posibles contaminantes que se encuentran en porcentajes mínimos y aumentando su potencial de generación eléctrica; de esta manera, el biogás también podría ser empleado en motores u otros sistemas de generación de energía más complejos.

- Realizar el análisis de la disminución de aranceles con el fin de conocer si el impacto económico es suficiente para conocer si es viable la implementación de un biorreactor en un campo petrolero

- Analizar el poder energético del biogás utilizando otros métodos diferentes al usado en este trabajo de investigación para determinar si es viable como fuente energética diferente a la eléctrica

- Realizar un estudio inverso donde se pueda conocer la cantidad de biogás y biomasa necesaria para suplir necesidades eléctricas industriales de bombas de producción u otros elementos de un campo petrolero.

- Realizar un perfil cinético completo del sistema para ser más precisos a la hora de escalar el biorreactor de laboratorio a escala industrial.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, «Cuenca Llanos Orientales información Geológica y Geofísica.,» [En línea]. [Revisado 10 febrero 2017]. Disponible en internet: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5.%20Informe%20Final%20 Llanos.pdf.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _, «Cuenca Llanos Orientales. Estudio integrado - crudos pesados.,» [En línea]. [Revisado 10 febrero 2017]. disponible: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Potencial%20de%20hidrocarburos%20en%20Colombia,%20Prof.%20Carlos%20A.%20Vargas%20(PDF).pdf.

AGUAMARKET. Bacterias facultativas [en línea], [20 Noviembre 2018]. Disponible en Internet: https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=171&termino= Bacterias+facultativas.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for total moisture in coal. [En línea]. [Revisado 18 de agosto 2018]. Disponible en internet: https://es.scribd.com/doc/213236720/D3302-Standard-Test-Method-for-Total-Moisture-in-Coal

ARROYAVE S., M.; VAHOS M., D. Evaluación del proceso de compostaje producido en un tanque biorreactor piloto por medio de bioaumentación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1999.

BERNAL VÉLEZ, Daniela y QUINTERO GARZÓN, Daniela; Desarrollo de una propuesta para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el recodo de Tabio, Cundinamarca. Tesis. Fundación universal de América. Bogotá. 2016. P. 29

BESEL, S.A., Departamento de Energía. Biomasa, digestores anaerobios [online]. Instituto de diversificación y ahorro de la energía. [citado 28 de Julio]. Disponible en internet: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

BROWN, Theodore L., et al. Química La ciencia central. 9 ed. México.: Pearson Educación de México, 2004. 1152 p. ISBN 970-26-0468-0

CADAVID RODRÍGUEZ, Luz Stella y BOLAÑOS VALENCIA, Ingrid Vanessa. Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. En: Energética. Diciembre, 2015. ISSN 0120-9833. P. 25

PACHECO. Op. Cit. p. 51

CALAO, Jorge. Caracterización ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías disponibles para la prevención y mitigación de impactos ambientales. Tesis de Grado Medellín, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2007. p. 32.

CALERO, Roque., CARTA, José A. y PADRÓN, José M., Tecnologías energéticas específicas. Capítulo 18: Energía de la biomasa y de los recursos sólidos, [En línea] [Revisado AGOSTO 22 DEL 2018]. Disponible en internet: https://docplayer.es/12647323-Energia-de-la-biomasa-y-de-18-los-residuos-solidos.html. P. 427

CARRASCO ALLENDES, Juan Luis. Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos. Tesis de maestría Santiago de Chile.: Universidad de Chile. 2015. P. 49

CARRILLO, Leonor. Microbiología agrícola. Argentina.: Universidad Nacional de Salta, 2003. 151 p. ISBN 987-9381-16-5. P. 118

CARTAGENA ARÉVALO, Julián Camilo y MALO MALO, Brian Orlando. Evaluación del uso de la microalga Chlorella vulgaris en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR el salitre a nivel laboratorio. Tesis. Fundación Universidad de América. Bogotá D.C., 2017. P.58

CASTRO, Mario. Presentación comercial Biotech [En línea], 14 de Febrero de 2017 [Revisado 22 de Septiembre de 2018]. Disponible en internet: https://connectamericas.com/sites/default/files/company_files/PRESENTACI%C3%93N%20COMERCIAL%20BIOTECH%20V4%2014-02-2017.pdf

CEBALLOS, Lorena; MERA, Juan Pablo. Elaboración del Plan de Manejo Ambiental de residuos sólidos durante la etapa de construcción de la Refinería del Pacífico Eloy Alfaro, sector El Aromo, provincia de Manabí. Tesis de Maestría Sangolqui, Ecuador.: Escuela superior politécnica del ejército. 2012. p. 134.

CHAMY, Rolando y VIVANCO, Elba. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la producción de biogás [online].

Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (GNE/ GTZ) [citado 28 de Julio; 18:21:02]

CHALCO, Liliana. Propuesta para la gestión de los residuos generados en las plataformas de perforación de petróleo, caso de estudio: Plataforma CCDC-38 Cantón lago agrio, Provincia de sucumbíos. Tesis de Grado Quito, Perú.: Escuela politécnica nacional. 2015. p. 6.

CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1715 (13, Mayo, 2014) Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional

CONTRERAS HUERTAS, A. M. y LEÓN VELANDIA, M. S. (2017) Evaluación de la factibilidad técnica de la implementación de La inyección de biosurfactantes en el campo Yariguí Cantagallo de Ecopetrol S.A. mediante simulación numérica (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Retrieved from http://hdl.handle.net/20.500.11839/6331

DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA VIGÉSIMA SEGUNDA EDICIÓN.

DINIZ GUERI, Matheus Vitor., et al. Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. En: Journal of Cleaner Production. Mayo, 2018. P 7

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. Uso inteligente de la energía eléctrica Banco de recomendaciones. EPM [en línea], marzo de 2012 [revisado 11 abril 2019]. Disponible en Internet: https://www.epm.com.co/site/portals/2/documentos/banco_de_recomendaciones_uso_inteligente_energia_electricamarzo_27.pdf

GARCIA RODRIGUEZ, Angie Mariana y GÓMEZ FRANCO, Juan Daniel. Evaluación de la producción de Biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de Abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Tesis. Fundación Universidad de América.2016. P. 36

GUERRA MILLÁN. Francisco Javier., STRUCK GARZA, Adelwat y VILLALOBOS STETA, Santiago Andrés. Caracterización de aguas residuales. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Universidad Iberoamericana. Ciudad de México. México D.F. [en línea] 8 de septiembre de 2008 [revisado 15 de octubre de 2018]. Disponible en internet: https://es.scribd.com/document/355498490/169162163-Caracterizacion-de-Aguas-Residuales

GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto; PEREZ SARIÑANA, Bianca Yadira y COMETTA CONDE, Silvia C. Biogás: Alternativa ambiental en el manejo de

residuos para su uso como energético sustentable. España: Editorial Académica Española, 2015. 144 p. ISBN 978-3-659-07190-4

HANSSON G., MOLIN. End Product Inhibition in Methane Fermentation: Effects of Carbon Dioxide and Methane on Methanogenic Bacteria Utilizing Accetare. Europcan J.Appl. Microbiol.Biotechnol, 1981. p. 236-247

IDEAM, Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia, 2016. Bogotá, D.C., 2016. p. 49.

IMAGUA WATHER TECHNOLOGIES. DBO y DQO. [En línea] [Revisado 02 de mayo de 2018].disponible en internet: http://www.imagua.es/pages/index/dbo-y-dqo

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C., Colombia. 23 de julio de 2008.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _. Calidad del agua. Demanda química de oxígeno DQO. NTC-3629 Bogotá D.C., Colombia. 20 de mayo de 2015.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. GTC-53-7. Bogotá D.C., Colombia. 26 de abril de 2006.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. NTC-5167 Bogotá D.C., Colombia. 23 de marzo de 2011.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C., Colombia. 23 de julio de 2008.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C., Colombia. 28 de octubre de 1998.

IPUZ GONZÁLES, Alejandra María y REYES CÁRDENAS, María Angélica. Diseño, construcción y arranque de un Reactor Anaerobio de flujo a Pistón (RAP) con guadua como medio de soporte, para el tratamiento de agua residual doméstica de un campamento de trabajadores de una piscícola. Tesis. Universidad de la Salle. Bogotá D.C. 2015. P.104

JARAMILLO HENAO, Gladys y ZAPATA MÁRQUEZ, Liliana María. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Tesis. Universidad de Antioquia. 2008. P. 35

Jiménez L.M. Medio ambiente y desarrollo alternativo. Madrid: Cofas.1989.p.187.

LOPEZ VEGA, Erick Emmanuel y RUIZ DELGADO, Mario Fernando. Celdas de combustible a partir de biogás: caracterización del proceso de generación eléctrica en el sector rural con IDEF0. Tesis. Universidad industrial de Santander. 2008. P. 40

MANZANILLA LÓPEZ, Rosa y MARBÁN MENDOZA, Nahúm. Aspectos Biológicos De La Estabilización Aeróbica II. Mundi Prensa Libros, 2012. ISBN 9788484765677

MEDLINEPLUS. Anaerobio [en línea], [20 Noviembre 2018]. Disponible en Internet https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002230.htm.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741 (30, Diciembre, 2005) por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

MINISTERIO DE ENERGÍA DE CHILE. Manual de biogás. [En línea] [Revisado 07 de mayo de 2018]. http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf

MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. Página 21.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _. Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility

PACHECO GONZÁLEZ, Sebastián Isaac. Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. 2016. P. 24.

PAREDES Raúl, BACA Marcos. Generación de energía con biogás de residuos agrícolas en plantas agroindustriales La Libertad – Perú. En: Third LACCEI International and Caribbean for Engineering and Technology. Junio, 2005. p. 1-16

PEÑA MARTÍN, Gonzalo. Tabla de composición de alimentos. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. Guía Para La Implementación De Sistemas De Producción De Biogás. 01 ed. Bogotá D.C: 2003.

PEREZ MEDEL, Javier Andrés. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Tesis. Universidad de Chile. 2010. P. 29

PINTO GOMEZ, Lina Paola y SUAREZ CUCHIMAQUE, Maidy Janeth. Propuesta para el manejo de residuos orgánicos producidos en la plaza de mercado de Chía (Cundinamarca). Tesis. Universidad distrital Francisco José de Caldas. 2016. P. 22

RAMIREZ, Julio Cesar., et al. Ingeniería básica para el proceso de generación de Biogás, a partir de porquinaza. En: Revista publicaciones e investigación. Agosto, 2010. Vol. 4. P. 95

REPÚBLICA DE COLOMBIA (minminas. UPME), invierta y gane con energía, guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. [En línea] [Revisado 02 de mayo de 2018].disponible en internet: http://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf

RODRIGUEZ MIRANDA, Nelson Andrés. Estudio de factibilidad técnica y financiera de utilización de biomasa para suplir necesidades energéticas en el edificio de bienestar universitario. Tesis. Universidad industrial de Santander. 2010. P. 18

Salas, G. d. La materia orgánica del suelo.1979.p.04

San Miguel, G y Gutiérrez F. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Madrid: Muldi-prensa, 2015.p.03.

Soto, J. G. Producción de abonos orgánicos de buena calidad. Bogotá: Produmedios, 2006.p.06

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, Colombia apuesta por los biodigestores para generar biogás en las áreas rurales. [En línea] [Revisado 02 de mayo de 2018]. Disponible en internet: http://www.upme.gov.co:81/sgic/?q=tags/biogas.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _., Colombia apuesta por los biodigestores para generar biogás en las áreas rurales. [En línea] [Revisado 02 de mayo de 2018].disponible en internet: http://www.upme.gov.co:81/SGIC/?q=pagina/sobre-nosotros

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _., Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Guía

para la implementación de sistemas de producción de Biogás, versión 01, Bogotá D.C, ICONTEC-AENE, 2003, P. 9.

UNIVERSO PORCINO. Beneficios en el uso de biodigestores. Argentina, 2011 [En línea] [Revisado 28 de agosto de 2018]. Disponible en internet: http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/internacionales_porcinas_01-2011_beneficios_en_el_uso_de_biodigestores.html

Weatherspark. El clima promedio en Puerto Gaitán [en línea], [revisado 25 noviembre 2018]. Disponible en internet: https://es.weatherspark.com/y/25246/Clima-promedio-en-Puerto-Gait%C3%A1n-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o

ANEXOS

ANEXO A.

PROTOCOLO CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO

OBJETIVO

Conocer las fuentes de generación, la cantidad y las características fisicoquímicas de los residuos orgánicos generados en Campo Rubiales y determinar si son aptos para la obtención de biogás.

PASO A PASO

1. Identificación de las fuentes de generación y cuantificación de residuos

Realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de la información proporcionada por Acipet acerca de los residuos generados en campo rubiales identificando fuentes, clasificando cada uno de estos entre orgánicos, ordinarios, reciclables y hospitalarios e industriales y totalizando la cantidad que se produce de cada uno de estos tipos de residuos.

2. Preparación de utensilios y equipos

IMPLEMENTOS	
Equipo personal	
Botas de seguridad	
Equipos de protección (bata)	
Mascaras o tapa bocas	
Guantes de nitrilo	
Equipos	
pH-metro	
Horno de secado	
Balanza analítica	
Desecador	
Tamiz 0.5mm	
Material de laboratorio	
Cápsulas de porcelana	
Espátula metálica	
Picnómetros 5 mL	
Reactivos	
Residuo	
Implementos de aseo	

Toallas absorbentes	
Alcohol	
Implementos de oficina	
Formato toma de datos	
Cuaderno de apuntes	
Esferos	
Cámara fotográfica	

3. Determinación del pH y temperatura inicial

Homogeneizar la totalidad del residuo proporcionado por Acipet, sumergir el pH-metro y tomar la medida, esperar 2 min y repetir el mismo procedimiento.

4. Determinación de la densidad

Lavar los picnómetros de 5 mL y secar en una estufa a 80 °C durante 30 min, dejar enfriar en desecador y tomar el peso de los picnómetros vacíos, añadir la muestra respectiva en cada picnómetro hasta llenarlo y tomar el nuevo peso, lavar los picnómetros nuevamente.

5. Secado de la muestra y determinación del contenido de humedad

Encender el horno de secado y configurar la temperatura a 40°C, simultáneamente pesar dos capsulas de porcelana vacías, adicionar 200 g del residuo en cada una y tomar el peso de las capsulas más muestra, una vez alcanzada la temperatura introducir las capsulas y cada 60 min tomar sus pesos, cuando se halla obtenido una variación menor a 0.5% en los pesos de la muestra, apagar la estufa y dejar enfriar.

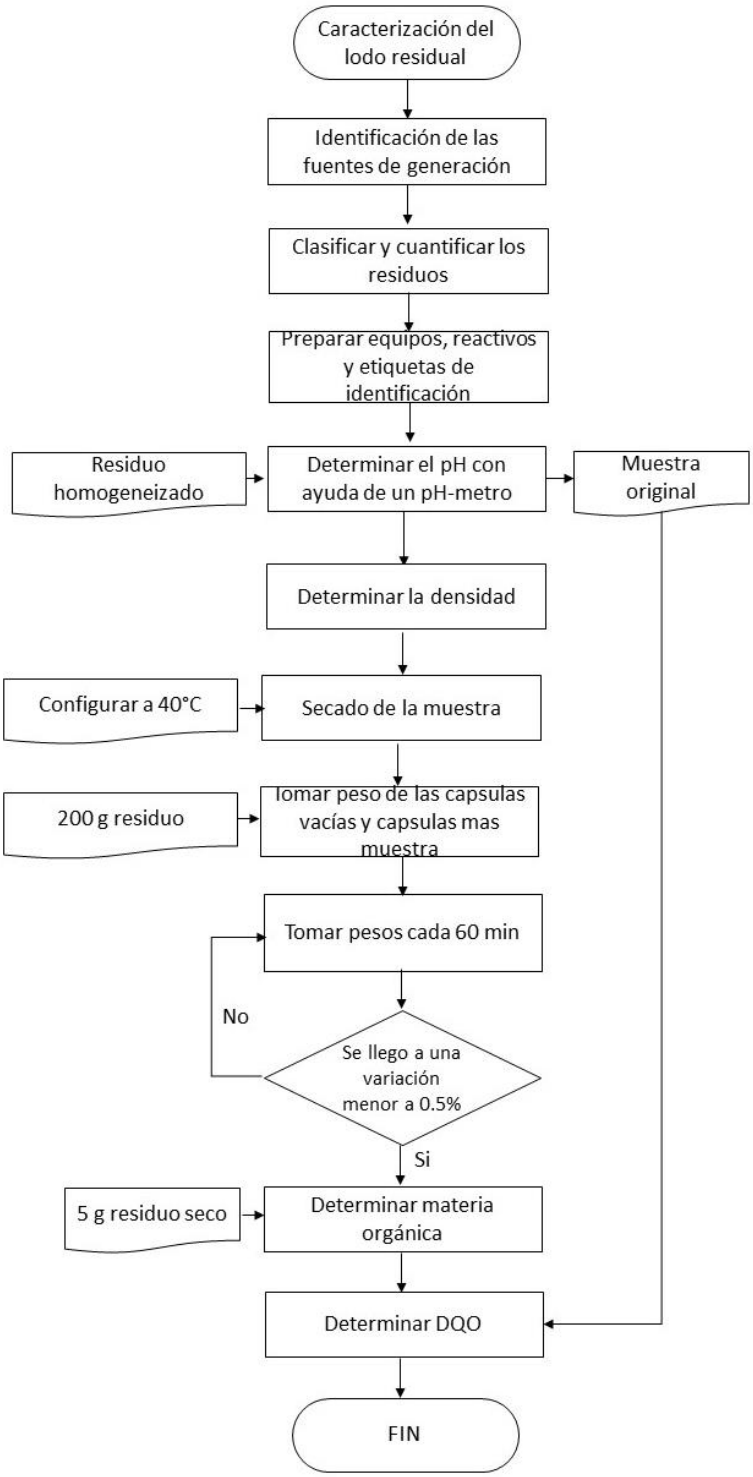
6. Determinación de materia orgánica.

Se realiza el análisis de materia orgánica, el cual, en ocasiones también es llamado determinación de sólidos volátiles, el procedimiento se realiza en base a la norma NTC 5167 y se detalla en el Anexo B.

7. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)

Se realiza la determinación de DQO en base a la norma NTC 3629 a partir del método colorimétrico, el procedimiento detallado se muestra en el Anexo C.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



FORMATO TOMA DE DATOS

- Tabla de datos para determinación de pH

Muestra	pH	Promedio

- Tabla de datos determinación de densidad

Muestra	W picnómetro vacío	W picnómetro lleno	W muestra	Densidad

Muestra	Densidad	Promedio

- Tabla de datos para la determinación de humedad

Identificación	Peso de crisol vacío (g)	Peso de crisol más muestra (g)

Muestra	% Humedad	Promedio

ANEXO B.

PROTOCOLO DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

OBJETIVO

Someter la muestra a altas temperaturas para determinar el contenido de materia orgánica presente en la muestra en conformidad con lo estipulado en la norma NTC 5167 teniendo en cuenta que este análisis corresponde principalmente al contenido de carbono y que por tanto a mayor materia orgánica, mayor será el potencial de biodegradabilidad del residuo.

PASO A PASO

1. Preparación de utensilios y equipos

IMPLEMENTOS	
Equipo personal	
Botas de seguridad	
Equipos de protección (bata)	
Mascaras o tapa bocas	
Guantes de nitrilo	
Equipos	
Balanza analítica	
Mufla	
Desecador	
Material de laboratorio	
Crisoles de porcelana	
Espátula metálica	
Reactivos	
Residuo	
Implementos de aseo	
Toallas absorbentes	
Alcohol	
Implementos de oficina	
Formato toma de datos	
Cuaderno de apuntes	
Esferos	
Cámara fotográfica	

2. Preparación de los crisoles

Incinerar los crisoles limpios a una temperatura de 550 °C durante 60 min, dejar enfriar en el desecador y tomar el peso del crisol vacío, añadir 5g del material previamente secado en el proceso de determinación de humedad y pesar nuevamente.

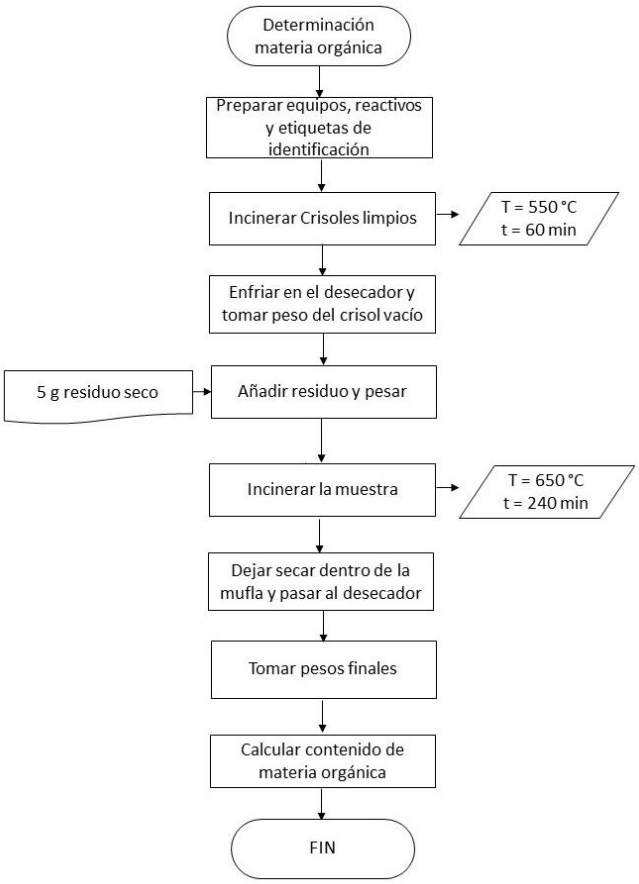
3. Incineración

Llevar los crisoles que contienen la muestra a la mufla marca B&M modelo MBT7.500 y programarla a 650 °C durante 240 min, al cabo de este tiempo dejar secar dentro de la mufla y pasar los crisoles al desecador.

4. Cálculo de materia orgánica.

Tomar los pesos finales de cada crisol y calcular el contenido de materia orgánica con ayuda de las Ecuaciones 2 y 3.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



FORMATO TOMA DE DATOS

N° Muestra	P1 g	P2 g	P3 g	%Perdida por ignición	Valor promedio

ANEXO C.

PROTOCOLO DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

OBJETIVO

Determinar la demanda química de oxígeno para el residuo analizado en conformidad con lo estipulado en la norma NTC 3629, la DQO se realiza para el residuo antes y después del proceso de biodigestión con el fin de determinar la cantidad de biogás producido.

PASO A PASO

1. Preparación de utensilios y equipos

IMPLEMENTOS	
Equipo personal	
Botas de seguridad	
Equipos de protección (bata)	
Mascaras o tapa bocas	
Guantes de nitrilo	
Equipos	
Espectrofotómetro	
Digestor de aluminio	
Material de laboratorio	
Matraz aforado de 1000 mL	
Tubos ópticos	
Tubos de digestión	
Pipeta graduada de 10 mL	
Pipeta graduada de 5mL	
Reactivos	
Residuo	
Agua destilada	
$K_2Cr_2O_7$	
H_2SO_4	
$HgSO_4$	
Ag_2SO_4	
KHP	
Implementos de oficina	
Formato toma de datos	
Cuaderno de apuntes	

Esferos	
Cámara fotográfica	

2. Preparación de la solución de digestión.

Agregar 500 mL de agua destilada en el matraz aforado de 1000 mL, añadir 10.216 g de $K_2Cr_2O_7$ previamente secados a 103 °C durante 120 min, 157 mL de H_2SO_4 y 33.3 g de $HgSO_4$. Disolver, enfriar a temperatura ambiente y llenar hasta el aforo.

3. Preparación de la solución de ácido sulfúrico.

Agregar sulfato de plata (Ag_2SO_4) en forma de cristales al ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado en una relación de 5.5 g de Ag_2SO_4/kg de H_2SO_4, dejar reposar durante 1 o 2 días para permitir la disolución completa del sulfato de plata.

4. Preparación solución estándar de ftalato ácido de potasio (KHP), 500 mg O_2/L.

Triturar ligeramente el biftalato de potasio y secarlo a 110 °C hasta obtener peso constante. Disolver 425 mg en agua destilada y diluir hasta el aforo en un matraz de 1000 mL. Conservar la solución refrigerada.

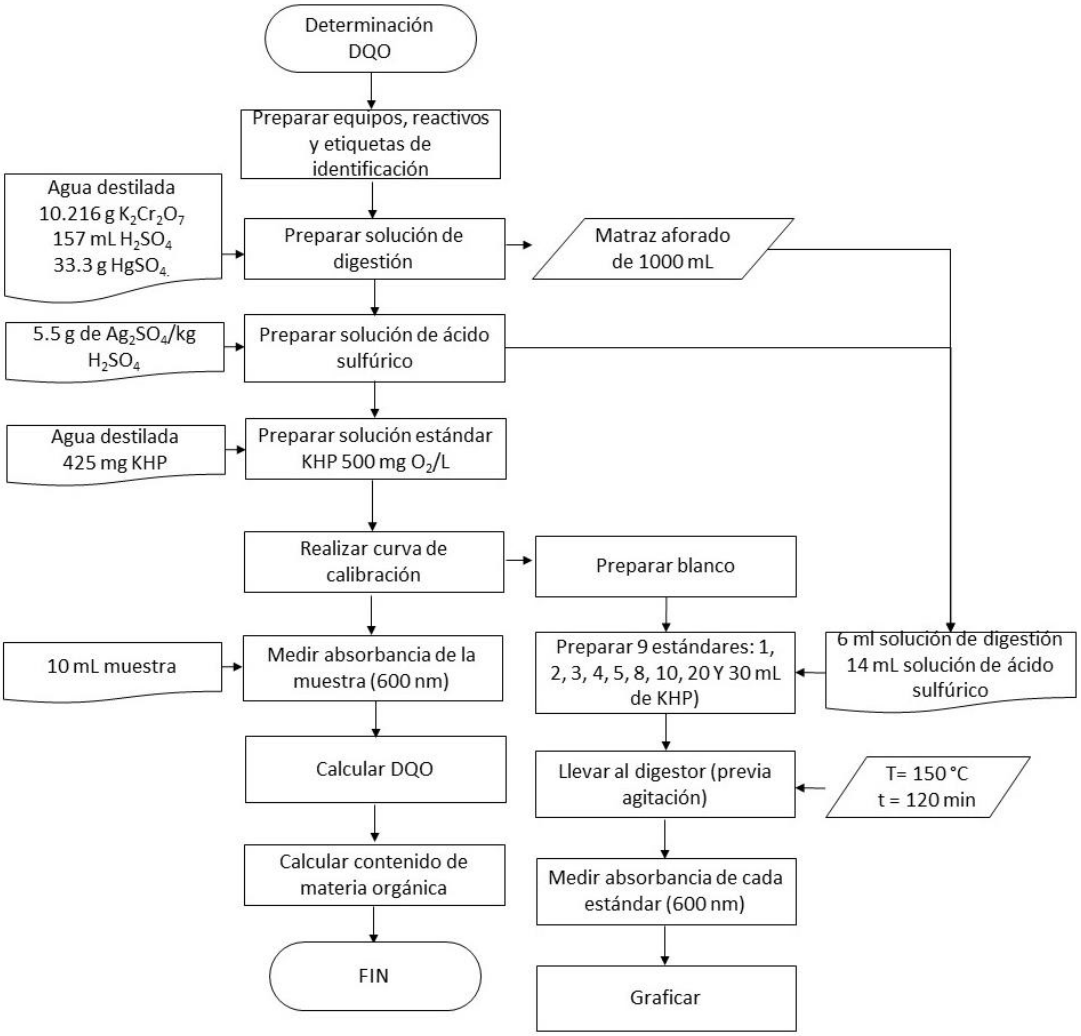
5. Realización de la curva de calibración

a) En un tubo de digestión de 10 ml añadir agua destilada, éste tubo será el blanco.
b) Pipetear en 9 tubos de digestión: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10 20 y 30 mL de la solución estándar de KHP y diluir con agua destilada hasta obtener 10 mL de solución; éstas soluciones corresponden a 50, 100, 150, 200, 250, 400, 500, 1000 y 1500 mg O_2/L respectivamente.
c) A cada tubo de digestión adicionar 6 mL de la solución de digestión y 14 mL de la solución de ácido sulfúrico preparadas en los pasos 2 y 3.
d) Tapar Los tubos de digestión y agitarlos vigorosamente, llevar los tubos al digestor el cual se debe encontrar configurado a 150 °C durante 120 min, posteriormente se deben dejar secar a temperatura ambiente en una gradilla que impida que los tubos se rayen.
e) Invertir los tubos varias veces esperando a que el sólido sedimente, descarte los tubos cuya solución se haya tornado de color verde.
f) Configurar el espectrofotómetro a 600 nm y realizar la curva de calibración graficando absorbancia vs mg O_2/L.

6. Medir la absorbancia de la muestra a analizar y calcular la DQO

Pipetear 10 mL de la muestra en un tubo de digestión, leer la absorbancia a 600 nm y calcular la DQO para cada muestra a partir de la Ecuación 6.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



FORMATO TOMA DE DATOS

Muestra	DQO (mg O_2/L)	Promedio

mg O_2/L	Absorbancia
0	
50	
100	
150	
200	
250	
400	
500	
1000	
1500	

ANEXO D.

PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIORREACTOR

1. Con la compra del bidón plástico de 60L, se perforaron orificios de ¾” en la parte baja en dos costados contrarios, uno para la alimentación y otro para la salida de los lixiviados que más técnicamente son llamados Biol en los biodigestores, adicional se hace un tercer orificio de ½” para un termómetro de mercurio.
2. Para la tolva de alimentación también es necesario perforar un orificio en el centro de su base de ¾” con el fin de conectar el tubo de PVC y que la biomasa pueda fluir.
3. Ya con los orificios hechos, es necesario adaptarlos mediante la instalación de empaques para evitar posibles escapes de fluidos y así mismo permitir conectar y asegurar la tubería desde el tanque de alimentación hasta la cámara de digestión.
4. Es necesario cortar la tubería de PVC de ¾” con el fin de poder conectar la tolva de alimentación con la cámara de digestión, se utiliza pegamento para PVC y un codo de 90° para la unión de la tubería proveniente de la tolva y la tubería de alimentación de la cámara de digestión. Este proceso se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Conexión tolva de alimentación con cámara de digestión

Fuente: elaboración propia

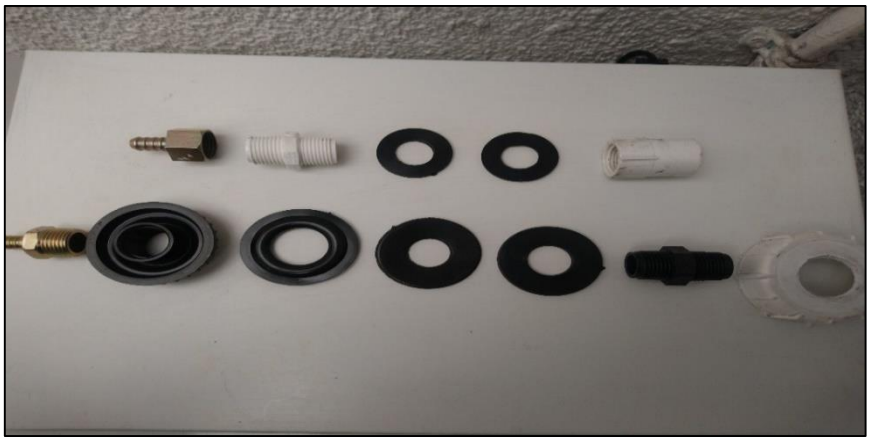
5. Para la salida del biogás, se conecta la manguera plástica con aislamiento amarillo al orificio que ya tiene por fabrica el gasómetro en su parte superior, la otra parte de la manguera, es conectada al orificio que tiene en la parte superior la cámara de digestión, en este mismo orificio es necesario utilizar una “T” para poder conectar un manómetro tal como se muestra en la Figura 19

Figura 19. Conexión cámara de digestión con gasómetro

Fuente: elaboración propia

6. Ambas salidas mostradas en la Figura 19 deben garantizar un sello hermético, por lo cual es necesario usar cinta de teflón, soldadura de PVC y empaques los cuales se muestran en la Figura 20.

Figura 20. Sellos herméticos



Fuente: elaboración propia

7. La salida restante de la cámara de digestión es por la cual saldrá el lixiviado, esta salida se encuentra en la parte inferior del recipiente; ya con este último procedimiento se culminaría la creación del biorreactor a escala laboratorio y se quedaría como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Montaje del biorreactor culminado

Fuente: elaboración propia

ANEXO E.

MATERIALES E INSTRUMENTOS PARA EL MONTAJE A ESCALA LABORATORIO DE UN BIORREACTOR

Cantidad	Elemento	Costo unitario	Costo total
1	Bidón 60L hermético	$ 38,000.00	$ 38,000.00
1	balde 5 gal	$ 9,000.00	$ 9,000.00
1	canasta plástica	$ 8,000.00	$ 8,000.00
1	Embudo	$ 23,000.00	$ 23,000.00
4	Racor macho manguera-rosca	$ 2,000.00	$ 8,000.00
4	Capsula en latón	$ 700.00	$ 2,800.00
1	Racor tee 1/4"	$ 4,500.00	$ 4,500.00
1	Manguera para gas 3/8"	$ 1,200.00	$ 1,200.00
1	Registro de gas	$ 9,000.00	$ 9,000.00
1	Gasómetro	CASERO	CASERO
1	Tubo 3/4" PVC x 6m	$ 13,000.00	$ 13,000.00
9	Registro 3/4" PVC	$ 2,400.00	$ 21,600.00
5	Codo 3/4" PVC	$ 800.00	$ 4,000.00
1	Limpiador PVC	$ 1,300.00	$ 1,300.00
1	Soldadura PVC	$ 4,500.00	$ 4,500.00
1	Cinta teflón	$ 1,500.00	$ 1,500.00
6	Flanche tanque 3/4"	$ 10,000.00	$ 60,000.00
4	Flanche tanque 1/2"	$ 10,000.00	$ 40,000.00
1	Tee 3/4"	$ 600.00	$ 600.00
6	Unión 3/4"	$ 600.00	$ 3,600.00
1	Tapón 3/4"	$ 1,000.00	$ 1,000.00
3	Poliuretano rígido	$ 20,000.00	$ 60,000.00
1	Plástico de polietileno x 5m	$ 30,000.00	$ 30,000.00
10	Lámina de icopor 1cm de grosor	$ 2,000.00	$ 20,000.00
2	Termómetro bimetálico bulbo 9" - 20 + 120°C	$ 86,000.00	$ 172,000.00
2	Manómetro 2" caja negro 0 - 60 psi	$ 13,000.00	$ 26,000.00
	TOTAL		$ 562,600.00

ANEXO F.

PROTOCOLO PROCESO DE BIODIGESTIÓN

OBJETIVO

Evaluar el efecto de la cantidad de biomasa inicial en un proceso de digestión anaerobia llevado a cabo en el montaje de biorreactor construido previamente. Se tendrán en cuenta 3 cantidades: 30 kg, 40 kg y 60 kg.

PASO A PASO

1. Preparación de utensilios y equipos

IMPLEMENTOS	
Equipo personal	
Botas de seguridad	
Equipos de protección (bata)	
Mascaras o tapa bocas	
Guantes de nitrilo	
Equipos	
pH-metro	
manómetro	
Material de laboratorio	
Termómetro	
Reactivos	
Residuo	
Pack de bacterias	
Agua	
Implementos de oficina	
Formato toma de datos	
Cuaderno de apuntes	
Esferos	
Cámara fotográfica	

2. Prueba de fugas.

Desde la tolva de alimentación llenar la cámara de digestión con agua para verificar que no existan fugas y evacuar el residuo por la zona de purga.

3. Cargar el residuo y el pack de bacterias.

Pesar el residuo y cargarlo en la tolva de alimentación, abrir la válvula de paso para que el residuo pueda ingresar a la cámara de digestión e ingresar el pack de bacterias por medio del orificio indicado.

4. Realizar control de pH y temperatura

Para realizar el control de temperatura basta con observar el termómetro que se encuentra adjunto al montaje del biorreactor, en el caso del pH se debe abrir ligeramente la purga y con ayuda del pH-metro tomar la medida, cerrar la purga en el mejor tiempo posible. Tomar la medida diariamente de preferencia a la misma hora.

5. Retirar los efluentes y limpiar.

Se debe desconectar el gasómetro de manera cuidadosa para evitar fugas, evacuar el biol de la cámara de digestión y almacenar refrigerado, limpiar el sistema de digestión y dejar secar.

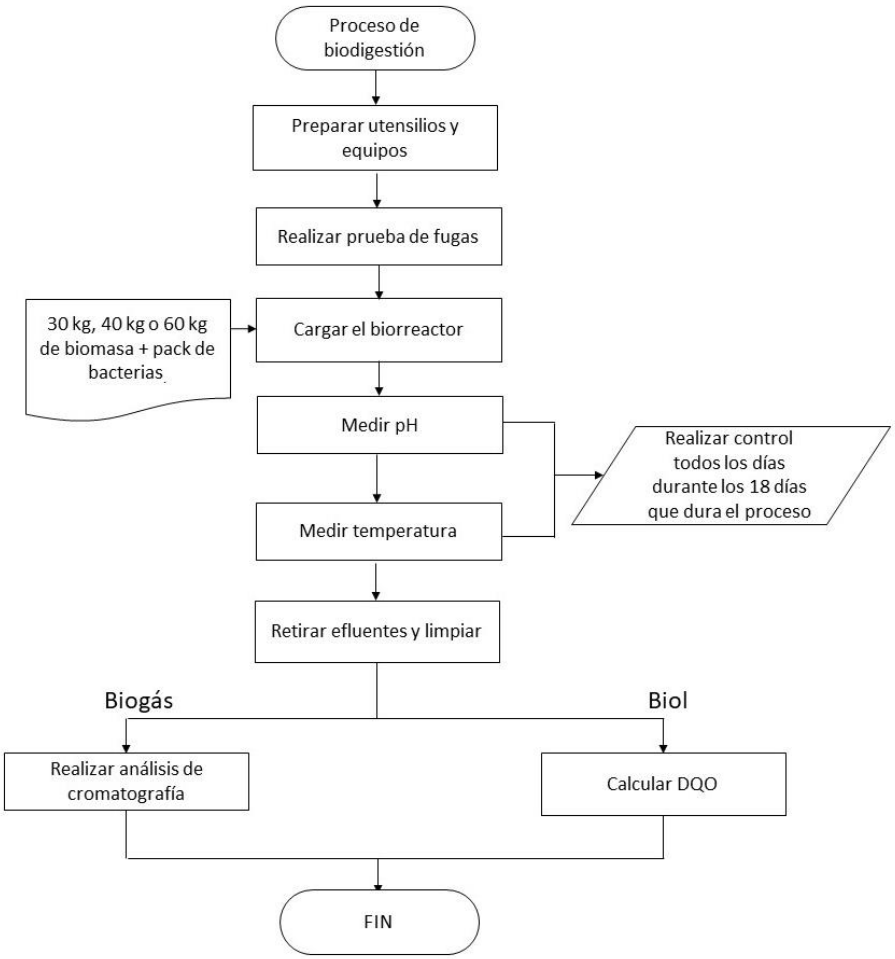
6. Realizar determinación de DQO al sustrato final

Determinar la DQO del sustrato final siguiendo el protocolo establecido en el Anexo C.

7. Realizar análisis de cromatografía al biogás

Enviar el biogás recolectado a un análisis de cromatografía de gases para determinar el contenido de metano (CH_4) y la posible formación de H_2O

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



FORMATO TOMA DE DATOS

Tiempo de retención (días)	pH		
	30 kg	40 kg	60 kg
0			
1			
2			
3			
…			
18			

Tiempo de retención (días)	Temperatura (°C)		
	30 kg	40 kg	60 kg
0			
1			
2			
3			
…			
18			

Biomasa inicial (kg)	Absorbancia	DQO (mg/L)	% Remoción DQO
30			
40			
60			

Biomasa inicial (kg)	% CH_4
30	
40	
60	

ANEXO G.

REGISTROS CONTROL DE PH EN EL BIODIGESTOR

Tiempo de retención (días)	pH		
	30 kg	40 kg	60 kg
0	7.1	7.1	7.1
1	7.0	7.0	7.0
2	6.8	6.8	7.0
3	6.7	6.8	6.9
4	6.7	6.8	6.9
5	6.6	6.7	6.8
6	6.5	6.4	6.7
7	6.3	6.2	6.6
8	5.8	6.0	6.3
9	5.3	5.0	6.0
10	5.1	4.8	5.9
11	5.0	4.8	5.9
12	5.2	5.0	6.2
13	5.5	5.2	6.3
14	6.0	5.7	6.4
15	6.4	6.0	7.0
16	7.0	6.3	7.5
17	7.6	6.6	7.9
18	7.8	7.0	8.0

ANEXO H.

REGISTROS CONTROL DE TEMPERATURA INTERNA DEL BIODIGESTOR

Tiempo de retención (días)	**Temperatura (°C)**		
	30 kg	**40 kg**	**60 kg**
0	20	20	20
1	19	20	20
2	19	20	22
3	19	21	22
4	20	21	22
5	20	21	23
6	21	21	23
7	21	22	24
8	21	23	24
9	22	23	24
10	23	23	25
11	24	25	27
12	24	26	28
13	24	26	29
14	25	27	30
15	25	28	31
16	26	28	32
17	27	28	32
18	27	29	31

ANEXO I.

MUESTRA DE CÁLCULOS EVALUACIÓN DQO DEL SUSTRATO FINAL

- **30 kg**

La absorbancia obtenida fue de 0.163

$$\frac{mg\ O_2}{L} = \frac{Absorbancia - 0.0072}{0.0004} = \frac{0.163 - 0.0072}{0.0004} = 389.5\frac{mg\ O_2}{L}$$

$$DQO_{salida} = \frac{389.5\frac{mg\ O_2}{L} \times 10}{10\ mL} = 389.5\frac{mg}{L}$$

Calculamos el porcentaje de remoción

$$\%\ Remoción\ DQO = \frac{1273.25\frac{mg}{L} - 389.60\frac{mg}{L}}{1273.25\frac{mg}{L}} \times 100\% = 69.41\%$$

- **40 kg**

La absorbancia obtenida fue de 0.145

$$\frac{mg\ O_2}{L} = \frac{0.145 - 0.0072}{0.0004} = 344.5\frac{mg\ O_2}{L}$$

$$DQO_{salida} = \frac{344.5\frac{mg\ O_2}{L} \times 10}{10\ mL} = 344.5\frac{mg}{L}$$

Calculamos el porcentaje de remoción

$$\%\ Remoción\ DQO = \frac{1273.25\frac{mg}{L} - 344.5\frac{mg}{L}}{1273.25\frac{mg}{L}} \times 100\% = 72.94\%$$

- **60 kg**

La absorbancia obtenida fue de 0.113

$$\frac{mg\ O_2}{L} = \frac{0.113 - 0.0072}{0.0004} = 264.5\frac{mg\ O_2}{L}$$

$$DQO_{salida} = \frac{264.5\frac{mg\ O_2}{L} \times 10}{10\ mL} = 264.5\frac{mg}{L}$$

Calculamos el porcentaje de remoción

$$\%\ Remoción\ DQO = \frac{1273.25\frac{mg}{L} - 264.5\frac{mg}{L}}{1273.25\frac{mg}{L}} \times 100\% = 79.23\%$$

ANEXO J.

CROMATOGRAFÍA DE GASES

Muestra: Biogas 30 kg

Compuesto	Tiempo de retención [min]	Área [mV.s]	Área [mV.s]	Area prom	% vol
H2	0.671	n.d*	n.d*		n.d*
O2	1.262	14105.7	14099.1	14102.4	12.2
CH4	5.529	54087.4	53998.5	54043.0	64.9

*n.d No detectado, por debajo del límite de detección (<0.05% v/v)

Muestra: Biogas 40 kg

Compuesto	Tiempo de retención [min]	Área [mV.s]	Área [mV.s]	Area prom	% vol
H2	0.671	n.d*	n.d*		n.d*
O2	1.262	17006.7	16928.8	16967.8	14.8
CH4	5.529	52169.6	52269.9	52219.8	62.7

*n.d No detectado, por debajo del límite de detección (<0.05% v/v)

Muestra: Biogas 60 kg

Compuesto	Tiempo de retención [min]	Área [mV.s]	Área [mV.s]	Area prom	% vol
H2	0.671	n.d*	n.d*		n.d*
O2	1.262	13289.1	13372.9	13331.0	11.5
CH4	5.529	56176.6	56384.4	56280.5	67.6

*n.d No detectado, por debajo del límite de detección (<0.05% v/v)

ANEXO K.

MUESTRA DE CÁLCULOS PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

- 30 kg

1. Calcular el flujo másico digerido por día

$$\dot{m} = \frac{biomasa\ inicial}{tiempo\ de\ retención} = \frac{30\ kg}{18\ días} = 1.66\bar{6}\ \frac{kg}{día}$$

2. Con ayuda de la densidad pasar a flujo volumétrico

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{1.66\bar{6}\ \frac{kg}{día} \times \frac{1000\ g}{1\ kg}}{1218.00\ \frac{g}{L}} = 1.3683\frac{L}{día} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.0013683\frac{m^3}{día}$$

3. Calcular la DQO removida

$$DQO_{remov} = DQO_{in} - DQO_{out} = 1273.25\ \frac{mg}{L} - 389.5\frac{mg}{L} = 883.75\frac{mg\ DQO}{L}$$
$$DQO_{remov} = 883.75\frac{mg\ DQO}{L} \times \frac{1000\ L}{1\ m^3} \times \frac{1\ g}{1000\ mg} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = 0.88375\frac{kg\ DQO}{m^3}$$

4. Calcular los kg de DQO que se remueven al día

$$\frac{DQO_{remov}}{día} = DQO_{remov} \times \dot{V} = 0.88375\frac{kg\ DQO}{m^3} \times 0.0013683\frac{m^3}{día} = 0.0012\frac{kg\ DQO}{día}$$

5. Calcular el volumen de biogás producido por día considerando que 1kg de DQO produce 850 L de biogás

$$Biogás\ producido = \frac{0.0012\frac{kg\ DQO}{día} \times 350\ L}{1\ kg\ DQO} = 0.4232\frac{L}{día} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.00042\frac{m^3}{día}$$

- 40 kg

1. Calcular el flujo másico digerido por día

$$\dot{m} = \frac{biomasa\ inicial}{tiempo\ de\ retención} = \frac{40\ kg}{18\ días} = 2.22\bar{2}\ \frac{kg}{día}$$

2. Con ayuda de la densidad pasar a flujo volumétrico

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{2.22\bar{2}\ \frac{kg}{día} \times \frac{1000\ g}{1\ kg}}{1218.00\ \frac{g}{L}} = 1.8245 \frac{L}{día} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.0018245 \frac{m^3}{día}$$

3. Calcular la DQO removida

$$DQO_{remov} = DQO_{in} - DQO_{out} = 1273.25\ \frac{mg}{L} - 344.5 \frac{mg}{L} = 928.75 \frac{mg\ DQO}{L}$$
$$DQO_{remov} = 928.75 \frac{mg\ DQO}{L} \times \frac{1000\ L}{1\ m^3} \times \frac{1\ g}{1000\ mg} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = 0.92875 \frac{kg\ DQO}{m^3}$$

4. Calcular los kg de DQO que se remueven al día

$$\frac{DQO_{remov}}{día} = DQO_{remov} \times \dot{V} = 0.92875 \frac{kg\ DQO}{m^3} \times 0.0013683 \frac{m^3}{día} = 0.0017 \frac{kg\ DQO}{día}$$

5. Calcular el volumen de biogás producido por día considerando que 1kg de DQO produce 850 L de biogás

$$Biogás\ producido = \frac{0.0017 \frac{kg\ DQO}{día} \times 350\ L}{1\ kg\ DQO} = 0.5931 \frac{L}{día} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.00059 \frac{m^3}{día}$$

- 60 kg

1. Calcular el flujo másico digerido por día

$$\dot{m} = \frac{biomasa\ inicial}{tiempo\ de\ retención} = \frac{60\ kg}{18\ días} = 3.33\bar{3}\ \frac{kg}{día}$$

2. Con ayuda de la densidad pasar a flujo volumétrico

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{3.33\bar{3}\ \frac{kg}{día} \times \frac{1000\ g}{1\ kg}}{1218.00\ \frac{g}{L}} = 2.7367 \frac{L}{día} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.0027367 \frac{m^3}{día}$$

3. Calcular la DQO removida

$$DQO_{remov} = DQO_{in} - DQO_{out} = 1273.25\ \frac{mg}{L} - 264.5 \frac{mg}{L} = 1008.75 \frac{mg\ DQO}{L}$$
$$DQO_{remov} = 1008.75 \frac{mg\ DQO}{L} \times \frac{1000\ L}{1\ m^3} \times \frac{1\ g}{1000\ mg} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = 1.00875 \frac{kg\ DQO}{m^3}$$

4. Calcular los kg de DQO que se remueven al día

$$\frac{DQO_{remov}}{día} = DQO_{remov} \times \dot{V} = 1.00875 \frac{kg\ DQO}{m^3} \times 0.0027367 \frac{m^3}{día} = 0.0028 \frac{kg\ DQO}{día}$$

5. Calcular el volumen de biogás producido por día considerando que 1kg de DQO produce 850 L de biogás

$$Biogás\ producido = \frac{0.0028 \frac{kg\ DQO}{día} \times 350\ L}{1\ kg\ DQO} = 0.9662 \frac{L}{día} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.00097 \frac{m^3}{día}$$

ANEXO L.

FLUJO DE CAJA PROYECTADO A 21 AÑOS

	1	2	3	4	5	6
+ingresos	$ 26,574,134	$ 28,168,582	$ 29,858,697	$ 31,650,218	$ 33,549,231	$ 35,562,185
-costos	$ 29,687,600					
utilidad bruta	$ - 3,113,466	$ 28,168,582	$ 29,858,697	$ 31,650,218	$ 33,549,231	$ 35,562,185
-gastos	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000
utilidad operacional	$ - 84,348,466	$ - 53,066,418	$ - 51,376,303	$ - 49,584,782	$ - 47,685,769	$ - 45,672,815
-gastos financieros	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
utilidad antes de impuestos	-$ 84,348,466	-$ 53,066,418	-$ 51,376,303	-$ 49,584,782	-$ 47,685,769	-$ 45,672,815
-impuestos (renta 15%)	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
utilidad neta	$ - 84,348,466	$ - 53,066,418	$ - 51,376,303	$ - 49,584,782	$ - 47,685,769	$ - 45,672,815
+depreciación	$ 1,968,760	$ 1,968,760	$ 1,968,760	$ 1,968,760	$ 1,968,760	$ 1,968,760
flujo de caja operativo	$ - 82,379,706	$ - 51,097,658	$ - 49,407,543	$ - 47,616,022	$ - 45,717,009	$ - 43,704,055

ANEXO L.
FLUJO DE CAJA PROYECTADO A 21 AÑOS (continuación)

	7	8	9	10	11	12
+ingresos	$ 37,695,916	$ 39,957,671	$ 42,355,132	$ 44,896,440	$ 47,590,226	$ 50,445,640
-costos						
utilidad bruta	$ 37,695,916	$ 39,957,671	$ 42,355,132	$ 44,896,440	$ 47,590,226	$ 50,445,640
-gastos	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000
utilidad operacional	$ - 43,539,084	$ - 41,277,329	$ - 38,879,868	$ - 36,338,560	$ - 33,644,774	$ - 30,789,360
-gastos financieros	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
utilidad antes de impuestos	$ - 43,539,084	$ - 41,277,329	$ - 38,879,868	$ - 36,338,560	$ - 33,644,774	$ - 30,789,360
-impuestos (renta 15%)	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
utilidad neta	$ - 43,539,084	$ - 41,277,329	$ - 38,879,868	$ - 36,338,560	$ - 33,644,774	$ - 30,789,360
+depreciación	$ 1,968,760	$ 1,968,760	$ 1,968,760	$ 1,968,760	$ -	$ -
flujo de caja operativo	$ - 41,570,324	$ - 39,308,569	$ - 36,911,108	$ - 34,369,800	$ - 33,644,774	$ - 30,789,360

ANEXO L.
FLUJO DE CAJA PROYECTADO A 21 AÑOS (continuación)

	13	14	15	16	17	18
+ingresos	$ 53,472,378	$ 56,680,721	$ 60,081,564	$ 63,686,458	$ 67,507,645	$ 71,558,104
-costos						
utilidad bruta	$ 53,472,378	$ 56,680,721	$ 60,081,564	$ 63,686,458	$ 67,507,645	$ 71,558,104
-gastos	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000
utilidad operacional	$ - 27,762,622	$ - 24,554,279	$ - 21,153,436	$ - 17,548,542	$ - 13,727,355	$ - 9,676,896
-gastos financieros	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
utilidad antes de impuestos	$ - 27,762,622	$ - 24,554,279	$ - 21,153,436	$ - 17,548,542	$ - 13,727,355	$ - 9,676,896
-impuestos (renta 15%)	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
utilidad neta	$ - 27,762,622	$ - 24,554,279	$ - 21,153,436	$ - 17,548,542	$ - 13,727,355	$ - 9,676,896
+depreciación	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
flujo de caja operativo	$ - 27,762,622	$ - 24,554,279	$ - 21,153,436	$ - 17,548,542	$ - 13,727,355	$ - 9,676,896

ANEXO L.
FLUJO DE CAJA PROYECTADO A 21 AÑOS (continuación)

	19	20	21
+ingresos	$ 75,851,590	$ 80,402,686	$ 85,226,847
-costos			
utilidad bruta	$ 75,851,590	$ 80,402,686	$ 85,226,847
-gastos	$ 81,235,000	$ 81,235,000	$ 81,235,000
utilidad operacional	$ - 5,383,410	$ - 832,314	$ 3,991,847
-gastos financieros	$ -	$ -	$ -
utilidad antes de impuestos	$ - 5,383,410	$ - 832,314	$ 3,991,847
-impuestos (renta 15%)	$ -	$ -	$ 598,777
utilidad neta	$ - 5,383,410	$ - 832,314	$ 3,393,070
+depreciación	$ -	$ -	$ 1.00
flujo de caja operativo	$ - 5,383,410	$ - 832,314	$ 3,393,071