



EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA ESPECIE INVASORA RETAMO ESPINOSO Y EL RESIDUO AGRÍCOLA RASTROJO DE MAÍZ MEDIANTE EL USO DE UN BIORREACTOR BATCH

1901-076

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, octubre de 2019

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO EN LA
DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA ESPECIE INVASORA RETAMO
ESPINOSO Y EL RESIDUO AGRÍCOLA RASTROJO DE MAÍZ
MEDIANTE EL USO DE UN BIORREACTOR BATCH**

1901-076

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Línea de Investigación:
Gestión para el desarrollo Urbano y Rural para el mejoramiento de la calidad de vida.
Ingeniería para la sostenibilidad de sistemas naturales.

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia

2019

Dedicatoria

A Dios, quien, con su inmensa sabiduría, ha puesto a las personas indicadas en mi camino de aprendizaje y desarrollo, me ha guiado, levantado y ayudado a seguir adelante cada día.

A mi madre, quien, con su gran amor, esfuerzo y dedicación estuvo presente en cada paso del desarrollo del proyecto, cada dificultad, cada logro, siempre pendiente y dispuesta a ayudarme, a animarme, a asegurarse que cumpla los sueños que me he propuesto en mi vida.

A mi abuelita, hermano, tía y demás familiares y amigos cercanos por su apoyo incondicional, por sus consejos, ánimos, colaboración en el desarrollo del proyecto y búsqueda de alternativas para la solución de las dificultades. Infinitas gracias doy por contar con personas tan maravillosas, llenas de sabiduría y paciencia que consiguen transformar un día oscuro en el más bello haz de luz.

Aura Marcela Simbaqueva Aguilera

Este trabajo se lo dedico a Dios, por la fortaleza que me brindó durante todo este proceso para no desfallecer y entregar lo mejor de mí.

A mis padres por ser el motor de mi vida, porque gracias a sus enseñanzas y a los valores que me han inculcado soy la persona que soy hoy en día. Además del esfuerzo y ayuda incondicional que siempre me han brindado, apoyándose en todas las decisiones que tomo y dándome todo su amor y cariño.

A mi hermano Dani, por sus consejos y ánimos que siempre me sacan una linda sonrisa en momentos difíciles. A mi abuelita y demás familiares por estar muy pendiente de mí en el desarrollo de este proyecto y por darme fuerzas para culminar mi carrera de la mejor manera.

Finalmente, a mis amigos por todas las experiencias que hemos compartido y los lazos de amistad que hemos formado.

María Alejandra Urrego León

Agradecimientos

En primer lugar, queremos dar gracias a Dios por la fortaleza, entendimiento y sabiduría que nos brindó durante el desarrollo de este proyecto.

A nuestras familias por estar siempre presentes, brindándonos su apoyo incondicional para cumplir y alcanzar nuestras metas y cumplir nuestros sueños.

A nuestro director Jhon Fredy Arias, por guiarnos y apoyarnos en este camino compartiendo sus conocimientos, tiempo y experiencias para culminar de manera exitosa el proceso de la elaboración del proyecto de grado.

Al programa de bioingeniería, especialmente a Yudtanduly Acosta y Kevin Gutiérrez por brindarnos el apoyo necesario para realizar los ajustes y programación del biorreactor.

A la PTAR El Salitre por el permiso otorgado para la recolección de los lodos digeridos y con ello la posibilidad de iniciar el proyecto, del mismo modo a la analista química Yolima Guzmán por su colaboración en la elaboración de pruebas de laboratorio y demás particularidades relacionadas con los procesos físicos y químicos del lodo anaerobio.

Al profesor Luis Fernando Gutiérrez, por brindarnos su colaboración en el trámite y recolección de la especie invasora retamo espinoso. Así mismo a los profesores Oscar Rodríguez y Fabio Díaz por su ayuda en temas de adquisición de reactivos. Y al profesor Jhon Alexander González por guiarnos con los ensayos de laboratorio.

A Ángel Triana por su colaboración en los procesos relacionados con préstamos de equipos de electrónica y espacios para el desarrollo de los ajustes del biorreactor, por su amabilidad y apoyo durante la ejecución del proyecto.

A Germán Agudelo, por su apoyo, ánimo, por sus valiosos consejos durante el desarrollo del proyecto y por ser una guía en este camino.

Auxiliares de laboratorio Zandy y Carolina por su colaboración en la realización de las prácticas de laboratorio, la disponibilidad de los instrumentos y espacios necesarios para su desarrollo.

SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1131

El día **28 OCT 2019**, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA ESPECIE INVASORA RETAMO ESPINOSO Y EL RESIDUO AGRÍCOLA RASTROJO DE MAÍZ MEDIANTE EL USO DE UN BIORREACTOR BATCH**, escrito por **AURA MARCELA SIMBAQUEVA AGUILERA, C.C. 1022410850** y **MARIA ALEJANDRA URREGO LEON, C.C. 1020818672**, bajo la dirección de **JHON FREDY ARIAS DUQUE, C.C. 75003493**, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **MARIA EUGENIA GUERRERO USEDA, C.C. 51857112** y **VIVIANA OSORNO ACOSTA, C.C. 52983338**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad, por lo que se determina que el trabajo es **Aprobado**.

En constancia, se firmó en Bogotá, D.C., **28 OCT 2019**



UNIVERSIDAD
EL BOSQUE
Programa de Ingeniería Ambiental

KENNETH OCHOA VARGAS
Director
Programa de Ingeniería Ambiental



UNIVERSIDAD
EL BOSQUE
SECRETARÍA ACADÉMICA
Facultad de Ingeniería

GERMÁN AGUDELO ASCENCIO
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería

Contenido

Resumen	12
Introducción.....	13
1 Planteamiento del problema	14
1.1 Descripción del problema.	14
1.2 Formulación del problema	15
1.3 Pregunta de investigación	16
1.4 Hipótesis	16
2 Justificación	16
3 Objetivos.....	17
3.1 Objetivo general.....	17
3.2 Objetivos específicos	18
4 Marcos de referencia	18
4.1 Estado del arte.....	18
4.2 Marco teórico-conceptual	22
4.3 Marco normativo.....	32
4.3.1 Marco regulatorio para generación de biogás.....	32
4.3.2 Marco regulatorio para la generación de energías renovables en Colombia. .	33
4.3.3 Marco regulatorio referente al manejo de la especie retamo espinoso (Ulex europeus).....	34
4.3.4 Marco regulatorio para la recolección de especímenes con fines investigativos.	35
4.4 Marco Institucional	35
4.5 Marco geográfico.....	39
4.5.1 Finca de maíz Copa de los Ángeles, Pasca, Cundinamarca.	39
4.5.2 Cerros orientales de Bogotá.....	40
4.5.3 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre.....	40
4.5.4 Universidad El Bosque – Sede Usaquéen	41
5 Diseño metodológico	42
5.1 Alcance	42
5.2 Enfoque	42
5.3 Método	42
5.4 Metodología	43

5.4.1	Objetivo 1.....	43
5.4.2	Objetivo 2.....	45
5.5	Técnicas e instrumentos.....	46
5.5.1	Objetivo 1.....	46
5.5.2	Objetivo 2.....	55
6	Resultados, análisis y discusión.....	57
6.1	Objetivo 1.....	57
6.1.1	Ajuste del biorreactor.....	57
6.1.2	Visitas técnicas para la recolección del sustrato e inóculo.....	60
6.1.3	Caracterización fisicoquímica del inóculo y sustrato.....	63
6.1.4	Definición de la razón de carga.....	69
6.2	Objetivo 2.....	71
6.2.1	Producción de metano y biogás.....	71
7	Conclusiones.....	88
8	Recomendaciones.....	89
9	Referencias bibliográficas.....	91
10	Anexos.....	101

Lista de Tablas

Tabla 1. Potencial energético de biomasa residual en Colombia.	16
Tabla 2. Síntesis de estudios de investigación realizados acerca del desarrollo de la digestión anaerobia.	19
Tabla 3. Composición física y química del rastrojo de maíz.	23
Tabla 4. Composición Física y química del retamo espinoso (<i>Ulex Europaeus</i>).	24
Tabla 5. Composición típica de biogás.	25
Tabla 6. Caracterización fisicoquímica lodo digerido PTAR Salitre	28
Tabla 7. Síntesis de las etapas del proceso de digestión anaerobia y microorganismos participantes.	31
Tabla 8. Comunicaciones emitidas por la CREG sobre la generación de biogás.	32
Tabla 9. Regulación de gas combustible en Colombia adoptada por la CREG.	33
Tabla 10. Marco regulatorio para la generación de energías renovables en Colombia.	34
Tabla 11. Regulación referente al manejo de la especie retamo espinoso (<i>Ulex europeaus</i>)	34
Tabla 12. Marco regulatorio para la recolección de especímenes con fines investigativos.	35
Tabla 13. Instituciones nacionales y regionales bajo las cuales se encuentra enmarcado el proyecto. Autores	35
Tabla 14. Valores para el ajuste y calibración de la sonda de pH.	46
Tabla 15. Técnicas y referencias utilizadas por el Laboratorio AGRILAB LTDA.	47
Tabla 16. Matriz metodológica.	55
Tabla 17. Caracterización del lodo digerido.	64
Tabla 18. Caracterización del rastrojo de maíz.	65
Tabla 19. Caracterización del retamo espinoso.	68
Tabla 20. Razón de carga del rastrojo de maíz.	70
Tabla 21. Razón de carga del retamo espinoso.	70
Tabla 22. Parámetros establecidos para el inicio del proceso de digestión anaerobia.	71
Tabla 23. Producción de biogás y metano en la digestión anaerobia del lodo digerido (Inóculo).	72
Tabla 24. Porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del inóculo.	74
Tabla 25. Producción de biogás y metano en la digestión anaerobia del rastrojo de maíz (sustrato) y lodo digerido (inóculo),	76
Tabla 26. Porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del Rastrojo de maíz.	78
Tabla 27. Producción de biogás y metano en la digestión anaerobia del Retamo Espinoso.	79
Tabla 28. Porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del Retamo Espinoso.	82
Tabla 29. Resultados del monitoreo inicial y final de la digestión anaerobia del inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso.	83
Tabla 30. Resultados del proceso de digestión anaerobia del inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso.	84

Listado de figuras

Figura 1. Síntesis proceso de digestión anaerobia y sus cuatro fases representativas. Adaptado de (Varjani , Gnansounou, Baskar, Pant, & Akmar Zakaria, 2018)	26
Figura 2. Ubicación del municipio de Pasca, Cundinamarca. Fuente: Delgado, 2009	39
Figura 3. Delimitación de los cerros orientales de Bogotá. Fuente: Google Earth	40
Figura 4. PTAR El Salitre. Fuente: Google Earth	41
Figura 5. Instalaciones Universidad El Bosque-Sede Usaquén. Fuente: Universidad El Bosque.	41
Figura 6. Metodología empleada para la realización del Objetivo 1	44
Figura 7. Metodología empleada para la realización del Objetivo 2	45
Figura 8. Gráfica de calibración de la sonda pH.	46
Figura 9. Calibración del sensor de metano.	47
Figura 10. Etapas del método Kjeldahl.	48
Figura 11. Biorreactor Batch.	58
Figura 12. Sistema de control.	58
Figura 13. Relé estado sólido.	59
Figura 14. Sonda de pH	59
Figura 15. Memoria Micro SD.	59
Figura 16. Modulo de Micro-SD para Arduino	59
Figura 17. Sensores MQ-4 y MQ-2	59
Figura 18. Cultivo de maíz de la finca en Pasca, Cundinamarca.	60
Figura 19. Especímen de retamo espinoso.	61
Figura 20. Fragmentos de retamo espinoso.	61
Figura 21. Molino Universidad Nacional de Colombia.	61
Figura 22. Sustratos molidos.	62
Figura 23. Lodo digerido.	62
Figura 24. PTAR El Salitre.	62
Figura 25. Estandarización de reactivos.	63
Figura 26. Análisis de sólidos del lodo digerido.	64
Figura 27. Determinación de los AGV	65
Figura 28. Análisis de sólidos del rastrojo de maíz.	66
Figura 29. Determinación del pH de la paja de maíz.	67
Figura 30. Análisis de sólidos del retamo espinoso.	68
Figura 31. Determinación del pH del retamo espinoso.	69
Figura 32. Producción de metano en la digestión anaerobia del inóculo. Autores.	73
Figura 33. Producción de biogás en la digestión anaerobia del inóculo. Autores	73
Figura 34. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia del Rastrojo de Maíz.	77
Figura 35. Producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del Rastrojo de Maíz	77
Figura 36. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia del Retamo Espinoso	81
Figura 37. Producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del Retamo Espinoso.	81
Figura 38. Monitoreo de Ph.	84
Figura 39. Producción máxima de biogás.	86
Figura 40. Producción máxima de metano.	86
Figura 41. Producción máxima de metano en porcentaje.	87

Listado de ecuaciones

Ecuación 1. Concentración NaOH.....	49
Ecuación 2. Concentración HCl	50
Ecuación 3. Alcalinidad.....	51
Ecuación 4. AGV.....	51
Ecuación 5. DQO.....	51
Ecuación 6. Humedad.....	52
Ecuación 7. Sólidos totales.....	53
Ecuación 8. Sólidos fijos	53
Ecuación 9. Sólidos volátiles.....	53
Ecuación 10. Sólidos totales para muestras sólidas.....	54
Ecuación 11. Sólidos fijos para muestras sólidas.....	54
Ecuación 12. Sólidos volátiles para muestras sólidas.....	54
Ecuación 13. ST carga de entrada del lodo al biorreactor.....	54
Ecuación 14. SV carga del lodo al biorreactor.....	54
Ecuación 15. SV carga del sustrato al biorreactor.....	54
Ecuación 16. Razón de carga.....	55

Siglas y abreviaciones

AGV	Ácidos Grasos Volátiles
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
CAR	Corporación Autónoma Regional
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
CH ₃ COOH	Ácido Acético
CH ₄	Metano
C/N	Relación Carbono/Nitrógeno
CO ₂	Dióxido de carbono
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
H ₂	Hidrógeno
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SIN	Sistema Interconectado Nacional
ST	Sólidos Totales
SF	Sólidos Fijos
SV	Sólido Volátiles
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
ZNI	Zona No Interconectada
ZI	Zona Interconectada

Anexos

Anexo 1. Árbol de problemas.....	101
Anexo 2. Etiqueta de embalaje.....	101
Anexo 3. Permiso de recolección de especímenes con fines investigativos emitido por la ANLA.....	102
Anexo 4. Trámite y acuerdo de confidencialidad PTAR El Salitre.....	103
Anexo 5. Cronograma del proyecto. Autores (2019).....	104
Anexo 6. Presupuesto del proyecto. Autores (2019).....	105

Resumen

El presente proyecto de investigación tuvo como fin la evaluación de la producción de metano a partir de la digestión anaerobia de la especie invasora retamo espinoso y el residuo agrícola rastrojo de maíz mediante el uso de un biorreactor Batch. Durante el desarrollo de la fase experimental se realizó el ajuste de algunos parámetros de funcionamiento del biorreactor, posteriormente se caracterizó el sustrato e inóculo en términos de análisis de sólidos, NT, N orgánico, humedad, pH, DQO, AGV y alcalinidad. Una vez realizada la caracterización se inició el proceso de digestión anaerobia en el biorreactor y se monitorearon diariamente las variables de temperatura, pH, concentración de biogás y metano. Así mismo, al inicio y final de cada corrida se realizaron pruebas de DQO, AGV y alcalinidad. El proceso de digestión anaerobia tuvo un tiempo de duración de 19 días para cada ensayo realizado (Inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso), la temperatura fue de aproximadamente 35°C, y el pH se mantuvo en un rango de 6,7-7,8, el mayor porcentaje de metano se obtuvo en la biodegradación del retamo espinoso, siendo este de 87,10%, con concentraciones de 2688,7 mg/L y 3086,91 mg/L de biogás y metano respectivamente. Por otro lado, la remoción más significativa de AGV Y SV fue la del retamo espinoso, con un porcentaje de remoción de AGV de 70,93%, y 77,30% de SV. De esta manera se comprobó la óptima capacidad de producción de metano de la digestión anaerobia del retamo espinoso en conjunto con el lodo digerido, como alternativa de fuente de energía para las zonas rurales de Colombia.

Palabras clave: Rastrojo de maíz, retamo espinoso, digestión anaerobia, metano.

Abstract

The purpose of this research was to assess the methane production from the anaerobic digestion of the invasive species retamo espinoso (*Ulex Europeaus*) and the agricultural residue corn straw (*Zea Mays*) using a Batch bioreactor. During the development of the experimental phase, some operation parameters of the bioreactor were adjusted, subsequently the substrate and inoculum were characterized in terms of solids, NT, organic N, humidity, pH, COD, AGV and alkalinity. Once the characterization was done, the anaerobic digestion process started in the bioreactor, variables such as the temperature, pH, biogas and methane concentration were monitored daily. Also, at the beginning and end of each run, tests of COD, VFA and alkalinity were carried out. The anaerobic digestion process lasted 19 days for each test performed (Inoculum, corn straw and retamo espinoso), the temperature was approximately 35°C, and the pH remained in a range of 6,7-7,8, the highest percentage of methane was obtained in the biodegradation of the retamo espinoso, which was 87,10%, with concentrations of 2688,7 mg/L and 3086,91 mg/L of biogas and methane respectively, the same as the most significant removal of VFA and SV with a removal percentage of 70.93% in VFA and 77.30% of SV. In this way, the optimal methane production was obtained by the anaerobic digestion of the retamo espinoso and digested sludge as an alternative energy source for rural areas of Colombia.

Key words: Corn straw, retamo espinoso, anaerobic digestion, methane.

Introducción

El estudio de potencial energético de la biomasa, teniendo en cuenta su aprovechamiento como fuente de energía en la producción de combustibles, se ha extendido por todo el mundo permitiendo incursionar en el mejoramiento de técnicas actuales para el procesamiento de la misma y su transformación energética, resaltando la posibilidad de que eventualmente pudiesen reemplazar a los combustibles convencionales. Las investigaciones, que ahora son cada vez más comunes, se están enfocando en temas que van desde el estudio de las propiedades químicas y termofísicas de diferentes plantas, pasando por el desarrollo de mejores técnicas de producción hasta la evaluación del potencial energético (González & González, 2015).

Una de las técnicas o procesos que contribuyen con la transformación de la biomasa para generar un aprovechamiento energético es la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un conjunto de procesos bioquímicos desarrollados en un ecosistema libre de oxígeno, mediante los cuales se logra la desintegración, transformación y estabilización de la materia orgánica biodegradable con la acción conjunta de varios grupos de microorganismos. Como productos finales del desarrollo de este proceso se obtienen una mezcla gaseosa conocida como biogás la cual está compuesta principalmente por gases como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además el fango efluente digerido el cual presenta gran cantidad de nutrientes propicios para la fertilización de terrenos cultivables (Cendales, 2011, p. 13).

Es importante resaltar que los procesos de biodegradación de los productos naturales han sido ampliamente estudiados, con el fin de descubrir mecanismos capaces de mitigar los impactos causados por la producción y descarte de residuos orgánicos en el ambiente. Entre las diferentes materias primas potenciales para ser utilizadas como sustrato en la digestión anaeróbica, los residuos lignocelulósicos parecen prometedores, ya que son ricos en carbono, están disponibles en abundancia y a bajo costo. Una de las posibilidades de aprovechamiento de estos residuos, es la implementación de biodigestores, que gracias a su funcionamiento permite la obtención de biogás que puede ser utilizado como fuente de energía (Pereira, Ferreira, Martínez, & Tomachuk, 2015).

El uso del metano contenido en el biogás puede llegar a reemplazar gradualmente los combustibles fósiles, debido a la rentabilidad específica que genera la producción de este biocombustible y la característica de carbono neutro que presenta (Møller, Sommer & Ahring, 2004). Es considerado una energía renovable en el mercado emergente que puede ser transformada en energía eléctrica, energía térmica, etc (Li, Chen & Wu, 2019). De esta manera, esta investigación tiene como objetivo evaluar la producción de metano en el proceso de digestión anaerobia, con la utilización de rastrojo de maíz (residuos agrícolas) y retamo espinoso (*Ulex europeaus*) triturado como sustrato, y lodo anaerobio proveniente de la Planta

de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre como inóculo, para la producción de metano a través de un biorreactor Batch del Programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque, Bogotá. Para el cumplimiento de este objetivo se realizará una caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo para establecer las condiciones de entrada al biorreactor e iniciar el proceso de digestión anaerobia y una vez finalizado comparar las mezclas en términos de producción de metano.

1 Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema.

Los pobladores de las zonas rurales de Colombia se han visto agobiados y afectados en el desarrollo energético a falta de la cobertura o prestación de servicios, siendo esta una de las grandes preocupaciones del Gobierno Nacional en cuanto a diseñar y garantizar mecanismos encaminados a satisfacer las necesidades de la población de manera eficiente y moderna (UPME, 1997). De acuerdo con el último censo realizado por el DANE (2018), el 15,8% de la población se encuentra localizada en zonas rurales dispersas, representando una población de aproximadamente 11.000.000 personas. Ahora bien, el suministro de energía en Colombia es sumamente limitado, casi inexistente, para suplir las necesidades de los habitantes alejados de los cascos urbanos. Técnicamente, estos territorios son conocidos como Zonas No Interconectadas (ZNI), aquellas en las cuales no llega un suministro de energía confiable para cumplir la demanda del sector rural (Pinilla, 2016).

Colombia se divide energéticamente en dos tipos de zonas: las Zonas Interconectadas (ZI) y la Zonas No Interconectadas (ZNI); las ZI son aquellas que tienen acceso al servicio de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las ZNI son aquellas que no tienen acceso al SIN. Las ZNI están ubicadas en lugares de difícil acceso, a largas distancias de los centros urbanos; carecen de infraestructura física y no cuentan con vías de acceso apropiadas. Son zonas de alta importancia ecológica; se caracterizan por su riqueza de recursos naturales y gran biodiversidad; encontramos allí la mayor parte de las reservas y parques naturales del país. Los servicios públicos son escasos y deficientes; carecen de servicios básicos como energía, acueducto y alcantarillado, y presentan dificultades para acceder a la educación, la salud, el agua potable y la comunicación (Steve, 2011, p. 8).

Otro de los factores importantes que vale la pena resaltar es que, como lo menciona Puertas (2016) “las políticas gubernamentales no están enfocadas en la ampliación de la cobertura nacional, dado que se concentran en cabeceras municipales y departamentales, lo cual desampara sectores con menor densidad poblacional” (p. 7). Además, la débil planeación y planificación del servicio de energía en estas zonas, ha generado una falta de priorización de planes de energización encaminados y enfocados a centros poblados pequeños, debido a la escasa capacidad técnica humana y la pausada capacitación por parte del estado a la población residente (Puertas, 2016). Sin embargo, a pesar de que en los últimos años se ha presentado avances en la ampliación de la cobertura, con implementación de energías renovables, resaltando proyectos tales como granjas solares en Inírida o la central de

generación de Mitú (Vaupés) (Gensa, 2019), todavía siguen persistiendo zonas que requieren alternativas de generación de energía no convencional.

Finalmente es importante resaltar que además de la problemática central que se abordará en este proyecto de investigación, se presenta otra problemática inmersa, siendo esta la invasión de la especie retamo espinoso (*Ulex europeaus*) a los ecosistemas locales de bosques altoandinos y páramos. La cual para el desarrollo de este trabajo representa una alternativa de producción de metano, teniendo en cuenta que es uno de los sustratos objeto de estudio para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, representando una oportunidad de manejo a una de las especies invasoras que más repercusiones ecológicas causan a los ecosistemas locales.

De este modo, la problemática radica en la deficiencia energética que se está presentando en las ZNI y la necesidad de contribuir con el desarrollo de fuentes de energía no convencionales, ampliando su cobertura, fácil acceso y costo moderado, que represente una oportunidad en la que las comunidades puedan suplir sus necesidades básicas de energía.

1.2 *Formulación del problema*

Como se mencionó anteriormente, la problemática principal se enfoca en la deficiencia energética en zonas rurales de Colombia, lo cual representa significativas consecuencias a nivel ecológico, económico y social.

A nivel ecológico, una de las causas principales que desencadenan dicha problemática es la deficiente formulación de políticas energéticas para las zonas rurales de Colombia, además de resaltar la falta de priorización de planes energéticos (Puerta, 2016). Esto claramente influye en que actualmente las poblaciones rurales se ven en la obligación de utilizar la leña como la principal fuente de energía para suplir sus necesidades básicas (Pinilla, 2016). Es por esto que, como consecuencias de la utilización de la leña, se contribuye con la deforestación y así mismo con la generación de emisiones de contaminantes atmosféricos, generando emisiones de CO₂ y otros inquemados a la atmósfera (UPME, 1997).

A nivel económico, se identificaron dos causas principales siendo estas la ausencia de infraestructura de movilización y transporte, la cual paralelamente conlleva a que la alternativa de electrificación convencional sea de difícil acceso para la población rural por los costos de inversión, y resaltando además la baja capacidad de pago por parte de los pobladores, generan una deficiencia energética. Como consecuencias directas, el servicio es insuficiente y costoso, en promedio se paga \$ 520,38 Cop/Kw (Superservicios, 2017), se paga el doble del promedio del SIN por Kw en las ZNI, además de mencionar que se recibe la mitad de las horas, ya que el 99% de las localidades tienen un servicio de menos de seis horas (Steve, 2011).

A nivel social, se distinguió que actualmente el 52% del territorio colombiano se encuentra dentro de las ZNI del país (Superservicios, 2017) y una de las causas de este significativo porcentaje es la dispersión de la densidad de la población en las zonas rurales (Puertas, 2016). Las principales consecuencias se traducen en tener un índice de necesidades insatisfechas

superior al 77% (Superservicios, 2017), teniendo en cuenta que se va a generar una restricción de oportunidades de educación, productividad y acceso a las TIC's (Superservicios, 2017), y esto a su vez produce un fenómeno migratorio de las zonas rurales a ciudades principales, así mismo se presenta un aumento en el desarrollo de enfermedades respiratorias por la quema de leña como combustible.

1.3 *Pregunta de investigación*

¿Cuál de las siguientes combinaciones produce mayor cantidad de metano en el proceso de digestión anaerobia: lodo digerido y retamo espinoso o lodo digerido y rastrojo de maíz?

¿Existen diferencias significativas en la producción de metano entre el proceso de digestión anaerobia del retamo espinoso (*Ulex Europaeus*) y del rastrojo de maíz?

1.4 *Hipótesis*

Hipótesis de investigación

El porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del rastrojo de maíz es mayor al obtenido por el retamo espinoso

Hipótesis nula

El porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del rastrojo de maíz es menor al obtenido por el retamo espinoso

Hipótesis alternativa

El porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia Del rastrojo de maíz es igual al del retamo espinoso.

2 **Justificación**

Considerando que Colombia cuenta con fuertes sectores agrícolas y pecuarios, actualmente está generando alrededor de 71 millones de toneladas al año de biomasa residual (Escalante, et al, 2011), que tienen asociado un importante potencial energético siendo este de 331.645, 71 TJ/año (Tabla 1). Esto se constituye en una oportunidad para el país en cuanto a la posibilidad de producir energía renovable a partir de su biomasa residual, pues como lo refiere (Appels et al., 2011) está claro que los recursos pueden jugar un papel crucial en la limitación de emisiones de CO₂. De acuerdo al Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, la biomasa residual del cultivo de maíz solo en el departamento de Cundinamarca representaría un potencial energético de 947,01 TJ/año. A nivel nacional representaría un potencial energético total de 20.795,80 TJ/año (Escalante, et al, 2011).

Tabla 1. *Potencial energético de biomasa residual en Colombia.*

Sector/Actividad	Cantidad anual de residuos (Ton/año)	Potencial energético (TJ/año)
Agrícola	71.943.813,00	331.645,71
Pecuario	105.418.066,00	117.747,70

Residuos sólidos orgánicos urbanos	120.210,00	91,72
Residuos sólidos urbanos de poda	44.811,00	318,13
Total	177.526.900,00	449.803,26

Fuente: (Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, 2011)

Por otro lado, la presencia de la especie invasora retamo espinoso (*Ulex europeus*) en los Cerros Orientales de Bogotá, está ocasionando repercusiones significativas a este ecosistema. Puntualmente, se ha observado un aumento en las coberturas de retamo espinoso, mostrando un comportamiento negativo sobre los bosques nativos como consecuencia de la transformación (Baptiste et al.2010).

El retamo espinoso es el complejo que más influye en la producción de combustible e inflamabilidad. Esta especie de alta regeneración natural posee un mecanismo de crecimiento que permite que las ramas inferiores sean un reservorio de necromasa. Esto sumado al poder calorífico de la biomasa de la especie, la velocidad de propagación y los aceites contenidos en sus semillas y ramas, que logran un perfecto conjunto para la ignición (Ocampo, 2019, pp. 4-5).

Al presentar dichas características, se produce una alteración en el régimen natural de disturbios al incrementar el riesgo de incendios (Amaya-Villareal & Renjifo, 2010), y con esto al aumentar los eventos de incendios forestales, debilita las poblaciones de especies vegetales nativas de porte arbóreo y arbustivo. De este modo, esta especie invasora puede reducir la densidad de las plantas que conforman el bosque nativo y convertirlos a matorrales o pastizales, o por el contrario en áreas colonizadas por la misma teniendo en cuenta que su reproducción asexual, a partir de estructuras vegetativas, es un mecanismo muy exitoso para la dispersión local. (Dukes & Mooney, 2004).

Finalmente se resalta la importancia de la utilización del biorreactor para la producción de biogás, producto de un diseño del Programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque. El biorreactor se diseñó y construyó con fines investigativos relacionados al proceso de digestión anaerobia. Este cuenta con agregados que permiten ajustar y controlar variables que resultan pertinentes durante el desarrollo del proceso. Dentro de estos agregados se encuentran el control de y monitoreo de la temperatura, pH, concentración de metano y la frecuencia de agitación.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la producción de metano en la digestión anaerobia de la especie invasora retamo espinoso (*Ulex Europaeus*) y residuo agrícola rastrojo de maíz, mediante el uso de un biorreactor Batch como alternativa de aprovechamiento energético de biomasa en el sector rural de Colombia.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas del rastrojo de maíz, retamo espinoso y lodo digerido para iniciar el proceso de digestión anaerobia en el biorreactor Batch.
- Comparar la producción de metano de la digestión anaerobia del retamo espinoso y del rastrojo de maíz en el biorreactor Batch para seleccionar la combinación de mayor porcentaje de metano.

4 Marcos de referencia

4.1 Estado del arte

La producción de biogás a partir de la descomposición de materia orgánica y residuos agrícolas surge como tema de interés para el hombre a finales del siglo XVII. Sin embargo, es durante el siglo XVIII que, John Dalton y Humphry Davy, documentaron de manera independiente la producción de un gas inflamable en la forma de metano a partir de la biodegradación de materia orgánica, proceso al que posteriormente se le conoce como digestión anaerobia, los microorganismos participantes en este proceso fueron aislados y estudiados a finales del siglo XIX. Países como Francia e Inglaterra, fueron los primeros en implementar esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales, y utilizaron el biogás generado como fuente de calor y luz durante el tratamiento (Aydin, 2017).

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, incrementaron los precios de los combustibles fósiles, razón por la cual India y China se convirtieron en los países líderes en la producción de biogás, a partir de la biodegradación de alimentos y desechos humanos, al representar una fuente de energía renovable disponible y de bajo costo. Massé, Talbot y Gilbert (2011), citados por Aydin (2017), afirma que, en la actualidad, debido a los problemas ambientales asociados a la utilización de combustibles fósiles y la necesidad de aprovechamiento de los residuos domésticos y agrícolas, el proceso de digestión anaeróbica ha sido considerado como un medio potencial para generar energía renovable.

A continuación, se exponen ocho trabajos de investigación que contribuyeron en la elaboración del presente proyecto, a partir de sus objetivos, resultados y materiales empleados para el inicio del proceso de digestión anaerobia así como, los parámetros de monitoreo tenidos en cuenta durante el proceso de producción de biogás, los sustratos e inóculos utilizados, específicamente residuos agrícolas y la especie invasora retamo espinoso, para lo anterior, se identificaron referentes académicos internacionales y nacionales, desde el año 2014 hasta el año 2019:

Tabla 2. Síntesis de estudios de investigación realizados acerca del desarrollo de la digestión anaerobia.

Año	Título	Autores	Lugar	Objetivo	Materiales	Resultados
2014	Producción de biogás a partir de la monodigestión de la paja de maíz – Efecto de adición de mineral natural	(González -Suárez , Da Silva , Oliva-Merencio , & Pereda-Reyes , 2014)	São Paulo, Brasil y La Habana, Cuba.	Evaluar la influencia de adición de mineral como micronutrientes sobre la monodigestión de la paja de maíz.	Inóculo Lodo de reactor UASB mesofílico de mataderos de aves Sustrato Paja de maíz/Mineral Natural Materiales Dos reactores de vidrio de tanque agitado (CSTRs), semicontinuo(1L).	Durante 117 días, se evaluaron los reactores R1 (Paja de maíz) y R2 (Paja de maíz + mineral natural) a temperatura mesofílica de 38° C, con valores de pH de 7,24-7,36 y tiempo de retención hidráulica de 25-30 días. El rendimiento de metano alcanzado por R1 y R2 fue de 167 y 198,54 mLCH ₄ /g SV, respectivamente.
2015	Dry co-digestion of sewage sludge and rice straw under mesophilic and thermophilic anaerobic conditions	(Chu, Wu, Wang, & Hu, 2015)	Provincia de Anhui, China.	Explorar y comparar el rendimiento de la codigestión de lodos de depuradora y paja de arroz en condiciones mesofílicas y termofílicas.	Inóculo Lodo de depuradora Sustrato Paja de arroz Materiales Reactores Batch de vidrio de 1.2 L, bolsas de almacenamiento de 10L	A temperatura de 35 ° C el TRH fue de 75 días se produjo 518 ml/g VS de biogás, con 59% de metano, mientras que a 55 ° C el TRH fue de 25 días, con una producción de biogás de 602 ml/g VS, y 60% de metano. El pH estuvo en un rango de 7,0-9,0 durante el proceso.
2016	Design, Fabrication and Experimentation of a Small Scale Anaerobic Biodigester for Domestic Biodegradable	(Jyothilaks hmi & Prakashb, 2016)	Bangalore, Karnataka, India	Fabricar un biodigestor portátil a partir de residuos domésticos para ser utilizado en todo tipo de condiciones climáticas	Inóculo: Estiércol de vaca Sustrato: residuos orgánicos domésticos Materiales: Latas vacías de PVC (30L), adhesivo a prueba de agua, bolsas de gas, tubos de PVC, válvulas	Durante veinte días de operación el valor del pH alcanzó 6.5 y se mantuvo constante. La temperatura estuvo entre 35-40° C durante el día y 25-30° C durante la noche. El rendimiento de biogás es de 0.425 m ³ / kg VS para los

	Solid Waste with Energy Recovery and Sizing Calculations.					residuos domésticos y 0.264 m ³ /kg VS para el estiércol de vaca.
2016	Response surface design to study the influence of inoculum, particle size and inoculum to substrate ratio on the methane production from Ulex sp.	(Costa, Oliveira, & Alves, 2016)	Braga, Portugal	Determinar la influencia del tipo de inóculo, diámetro de partícula del sustrato y la relación inóculo sustrato (ISR) en el Potencial bioquímico de metano (BMP) y tasa de producción de metano (k)de Ulex sp.	Inóculos: Lodo anaeróbico suspendido, Lodo granular anaeróbico, de una industria cervecera y una mezcla de los dos inóculos (50/50 TS) Sustrato: Ulex sp. Con diámetros de 0.5 mm, 2.25 mm y 4 mm Materiales: botellas Batch, escala laboratorio Cromatografía de gases.	Las condiciones óptimas para maximizar el potencial bioquímico de metano son inóculo de 55% de lodo granular, 45% de lodo suspendido, y tamaño de partícula de 1.85 mm, con pH entre 7.21 y 7.40, tiempo de retención hidráulica de 45 días a temperatura de 35°C, bajo estas condiciones se produjo 313 L/Kg SV, siendo este 80% de metano presente en el biogás total.
2017	Definição dos parâmetros de Dimensionamento e de operação de um Biodigestor anaeróbico piloto para Produção de biogás no tratamento de Palha de milho	(Fonseca Padilha, 2017).	Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil	Definir los parámetros de dimensionamiento y de operación de un biodigestor anaerobio en escala piloto para la producción de biogás en el tratamiento de paja de maíz.	Inóculo Lodo anaerobio fresco de reactor UASB Sustrato Paja de maíz Materiales Fracos antibiótico de 250mL. Incubadora Shaker.	El volumen útil del reactor dimensionado fue de 50mL, bajo régimen de alimentación semicontinua, vía húmeda, con tiempo de retención hidráulica de 30 días, temperatura de 35° C, con una producción estimada de 39,2L/d de biogás y 21.7L/d de metano. Es decir, un porcentaje de 55,35% de metano contenido en el biogás producido.
2018	Biodegradation of rice straw	(Candia-García &	Saldaña, Tolima,	Encontrar una alternativa respetuosa con el medio	Inóculo Estiércol de vaca	La relación I/S 0,8 presentó la mayor producción de biogás

	under anaerobic digestion	Delgadillo -Mirquez, 2018)	Colombia.	ambiente para la disposición de la paja en las zonas rurales.	Sustrato Cuatro variedades de paja de arroz Materiales Botellas para pruebas Batch	siendo de 306 L / kg VS, con contenido de metano superior al 70%. El pH estuvo en 6,5, durante 60 días a temperatura de 25-27°C.
2018	Study on improving anaerobic co-digestion of cow manure and corn straw by fruit and vegetable waste: Methane production and microbial community in CSTR process	(Wang, et al., 2018)	Beijing, China.	Mejorar la codigestión anaeróbica del estiércol de vaca y la paja de maíz.	Inóculo Estiércol de vaca Sustrato Paja de maíz Residuos de frutas Materiales Reactor CSTR de 1L	Los grupos de estudios son: A (9,93g/d de estiércol de vaca, 0,35 g/d de paja de maíz, 2,07 g/d de residuos de frutas), B (10.29 g/d de estiércol de vaca, 0,36 g/d de paja de maíz, 0,43 g/d de residuos de frutas) y C (14,64 g/d de estiércol de vaca, 0,38 g/d de paja de maíz), con TRH de 15 días a 38°C y pH de 7,2 a 7,8. La mayor producción de metano ocurre en el grupo A con 509,00 mL/d.
2019	Biogas production and synergistic correlations of systematic parameters during batch anaerobic digestion of corn straw	(Mao, Xi, Feng, Wang, & Ren, 2019)	Yangling, China	Investigar los efectos del contenido de TS y el pH inicial en la producción de biogás, los parámetros del proceso y los parámetros cinéticos de la monodigestión anaeróbica de la paja de maíz, y sus correlaciones sinérgicas.	Inóculo Lodo de reactor anaeróbico mesofílico doméstico Sustrato Paja de maíz Materiales 4 reactores Batch a escala de laboratorio de 1L	Se realizan pruebas con porcentajes de 4%, 8% y 12% de Sólidos Totales, con pH de 6,5 a 8,0, a temperatura de 35°C, en un TRH de 50 días, La mayor producción de biogás 457,8 mLg ⁻¹ -VS, se alcanza con un pH inicial de 7,5, con 4% de sólidos totales.

Fuente: Autores (2019)

A partir de los estudios seleccionados, se obtienen valores estimativos de los parámetros influyentes en el proceso de digestión anaerobia los cuales son: pH, Tiempo de retención hidráulica, temperatura, relación inóculo sustrato, del mismo modo se adquiere información sobre los datos de biogás y metano generado mediante diferentes tipos de sustratos (paja de arroz, paja de maíz, residuos orgánicos domésticos) e inóculos (lodo anaerobio, estiércol de vaca).

En la digestión anaerobia de la paja de maíz como sustrato, se destacan valores de pH iniciales de 7,5 con rangos variables de 6,5 a 8,0, durante el desarrollo del proceso. La temperatura mesofílica presenta los mayores resultados de producción de metano, con valores clave de 35°C y 38°C, en tiempos de retención hidráulica de 15 a 50 días (González-Suárez , Da Silva , Oliva-Merencio , & Pereda-Reyes , 2014; Wang, et al., 2018; Mao, Xi, Feng, Wang, & Ren, 2019). Para el retamo espinoso el rango óptimo de pH es de 7,21-7,40, a temperatura de 35°C en 45 días de estudio (Costa, Oliveira, & Alves, 2016).

4.2 Marco teórico-conceptual

El desarrollo de energías renovables ha sido clave para prevenir problemas de contaminación, combatir el cambio climático y atenuar el agotamiento de la reserva de combustibles fósiles. Estas energías se caracterizan por originarse a partir de fuentes alternativas disponibles en la naturaleza, actúan como complemento de las fuentes energéticas tradicionales (carbón, petróleo, gas natural y otros) y pueden ayudar a reducir la dependencia de las energías de origen fósil (Roldán, 2013; Wu, Xu, & Yang, 2018). Dentro de las principales formas de energía renovable se encuentran: Hidroeléctrica, Eólica, Solar y Biomasa.

Según Salvador (2010) “La biomasa es un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza y composición, que puede emplearse para obtener energía” (p. 332). La producción de energía a partir de biomasa basa su funcionalidad en el uso de materiales biológicos o naturales denominados lignocelulósicos por estar compuestos por lignina y celulosa (Oshiro, 2016), los cuales son principalmente residuos agrícolas o material vegetal (plantas), caracterizados por ser fuentes neutras en carbono. La energía de la biomasa se puede extraer mediante procesos termoquímicos (usando calor) o bioquímicos (usando enzimas, bacterias). Como combustible, puede incorporar residuos de madera, paja o rastrojo, caña de azúcar y otros subproductos generados en los procesos agrícolas (Bose, Kandpal, Dhawan, Vijay, & Gopinath, 2018).

Dentro de la biomasa proveniente de los residuos agrícolas se encuentra el rastrojo de maíz definido como: “Porción de hojas, tallos, espigas y brácteas de la mazorca que queda después de extraer el grano” (Reyes, Camacho & Guevara, 2013, p. 234). Aunque la paja o rastrojo, puede ser utilizada como suplemento alimenticio para el ganado, no es popular en muchas partes del mundo puesto que sus nutrientes no se almacenan de manera adecuada y disminuyen con el tiempo debido a la degradación biológica. Glassner et al (1999) citado por Huang, Jeuck, & Yong (2017) menciona que solo alrededor el 5% de la paja es utilizada como alimento para el ganado, mientras que el resto es quemado en los campos después de la cosecha, generando emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Parfitt et al. (2010) y Lynd y Woods (2011), citados por Huang, Jeuck, & Yong (2017) afirman que el

aprovechamiento de los residuos agrícolas genera beneficios considerables para la sostenibilidad del ambiente, dentro de los cuales se encuentran: la disposición adecuada de los residuos agrícolas, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, enfoque sostenible para la producción de combustibles y productos renovables neutros en carbono entre otros.

En seguida, se presenta la composición física y química típica del rastrojo de maíz:

Tabla 3. *Composición física y química del rastrojo de maíz.*

Variable	Unidades	Valor teórico	Valor práctico
Sólidos Totales (ST)	g ST/g	0,94	0,913
Sólidos Fijos	g SF/g	-	0,135
Sólidos Volátiles (SV)	g SV/g	0,874	0,778
C/N	-	71	25,1
N	%	0,65	1,38
C	%	46,2	34,7

Adaptado de (Croce, Wei, D'Imporzano, Dong, & Adani, 2016; Zhang, Xu, Liang, Yang, & Liu, 2019).

Ragauskas et al. (2014) citados por Huang, Jeuck, & Yong (2017) afirman que, los principales polímeros presentes en los residuos agrícolas como el rastrojo de maíz son, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina (tabla 3). En la pared celular del rastrojo de maíz y demás residuos lignocelulósicos, la lignina funciona como el "pegamento" celular que proporciona rigidez al tejido vegetal y resiste a los insectos y patógenos.

Además de los residuos agrícolas, existen otros materiales vegetales compuestos por lignina dentro de los cuales se encuentra el Retamo espinoso (*Ulex Europeaus L*), que, según Ríos, Hurtado y Solorza (2013), es definida como “Especie vegetal invasora de importancia mundial, que se instala principalmente en ecosistemas altoandinos y áreas productivas” (p. 2). Esta especie es originaria de Europa, sus áreas naturales de distribución se encuentran en las planicies de Portugal y España, fue introducida en la cordillera oriental de los Andes colombianos, y allí encontraron condiciones favorables para su desarrollo: alta humedad, suelos ácidos, temperatura moderada, deterioro ecológico de bosques altoandinos y páramos (Ríos, Hurtado, & Solorza, 2013).

El retamo espinoso cuenta con una capacidad reproductiva excepcional, se adapta fácilmente a condiciones ambientales desfavorables y produce un gran número de semillas que son almacenadas en el suelo. Estas especies fueron propagadas en la primera mitad del siglo XX, en la jurisdicción de la CAR, con el fin de dar continuidad a los programas de reforestación y restauración de suelos de canteras, como cercas vivas y corredores de protección a cuerpos hídricos (Ríos, Hurtado, & Solorza, 2013).

Además, el retamo espinoso tiene aceites en sus espinas y semillas, por lo cual se considera altamente inflamable, requiere de luz o fuego permanente para su reproducción, puesto que de esta manera facilita la propagación de sus semillas. En la presencia de fuego, las vainas

hacen combustión y sus semillas son expulsadas para colonizar otros territorios (Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2015).

A continuación, se ilustra la composición física y química del retamo espinoso (*Ulex Europaeus*):

Tabla 4. *Composición Física y química del retamo espinoso (Ulex Europaeus).*

Variable	Unidades	Valor
Sólidos totales (ST)	gST/g	0,68 +/- 0,02
Sólidos Volátiles (SV)	gSV/g	0,66 +/- 0,02
Nitrógeno Kjeldahl total (NKT)	%	1,63
Amonio (N-NH4)	%	0,8
Lignina	%	17
Xileno	%	5,5
Glucano	%	17,5

Adaptada de (Costa, Oliveira, & Alves, 2016).

Balero (2010), citado por Ríos, Hurtado, & Solorza (2013) asegura que “las especies de retamo fijan nitrógeno en el suelo gracias a asociaciones simbióticas en las raíces con micorrizas, acidifican el suelo y producen gran cantidad de semillas resistentes a altas temperaturas, con rápida regeneración vegetativa y reproductiva” (p.24).

La **digestión Anaerobia** es un proceso bioquímico que ocurre en ausencia de oxígeno, dentro de biodigestores que transforman materia orgánica en biogás y en digestato fértil o biol (Jugal Sukhesh & Venkateswara Rao, 2018). El primero de los productos de la digestión anaerobia está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, el biol se caracteriza por ser una sustancia en suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica, capaz de sustituir a los fertilizantes químicos utilizados en la agricultura, aumentando su productividad de un 30 a un 50 en porcentaje (Cendales Ladino, 2011; Acosta & Obaya, 2005).

Cabe resaltar, que la digestión anaerobia funciona gracias a un conjunto de microorganismos específicos, dentro de los cuales se encuentran: las bacterias fermentativas (hidrólisis y acidogénesis), bacterias acetogénicas productoras y consumidoras de hidrógeno (Acetogénesis), bacterias metanogénicas reductoras de dióxido de carbono (metanogénesis) (Varjani, Gnansounou, Baskar, Pant, & Akmar Zakaria, 2018).

Como se menciona previamente, el **biogás** es uno de los productos generados a partir de la digestión anaerobia, cuyo poder calorífico varía según su composición de metano (entre el 60-65%) siendo este en promedio 47.341,2 Kj/Kg (Martina, Aeberhard, Corace, & Bucki Wasserman, 2011). En adición, la eficiencia global de conversión de la energía química del biogás en energía eléctrica producida es aproximadamente de 38-39% (Pascual Vidal, Ruíz Fuertes, Fernández, Toufik, & Gómez Barrios, 2009).

A continuación, se presenta la composición típica del biogás producido por digestión anaerobia:

Tabla 5. Composición típica de biogás.

Componente	Concentración
Metano (CH₄)	50% - 75%
Dióxido de carbono (CO₂)	25% - 45%
Agua (H₂O)	2% -7%
Sulfato de hidrogeno (H₂S)	20 – 20000 ppm
Nitrógeno (N₂)	< 2%
Oxígeno (O₂)	< 2%
Hidrogeno (H₂)	< 2%

Adaptado de (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010)

En síntesis, el biogás está compuesto por gas metano con un porcentaje representativo que varía del 50 al 75%, dióxido de carbono con un valor considerable en su composición siendo este de 25 a 45%, y otros gases llamados gases traza por ser pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí (Acosta & Obya, 2005, p. 36).

El proceso de Digestión Anaerobia se desarrolla en cuatro etapas, inicia con la hidrólisis, en donde los carbohidratos, proteínas y lípidos (compuestos orgánicos complejos) son transformados en monómeros simples, los microorganismos participantes en esta etapa están determinados por la composición del sustrato, en su mayoría son bacterias Gram positivas como *Clostridium Spp.* capaces de digerir materiales lignocelulósicos; el proceso continua con la fase de acidogénesis, en donde las bacterias acidogenicas convierten los monómeros simples en ácidos grasos volátiles (Aydin, 2017).

Hattori (2008) y Aydin et al (2015) citados por (Aydin, 2017), indican que en la etapa de Acetogénesis, los ácidos grasos volátiles, son convertidos en acetato por las bacterias acetogénicas, durante el proceso se obtiene hidrogeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂). Las reacciones acetogénicas no son energéticamente favorables, y demandan condiciones ambientales especiales para que este proceso tenga éxito. Además, requieren una concentración muy alta de ácidos grasos volátiles y la baja presión parcial de hidrógeno para el cumplimiento de este proceso. Al finalizar, las Arqueas metanogenicas se encargan de convertir el H₂ producido en metano, concluyendo con la etapa de metanogénesis (Aydin, 2017). A continuación, se muestra un esquema resumen de las etapas de la digestión anaerobia, descritas previamente:

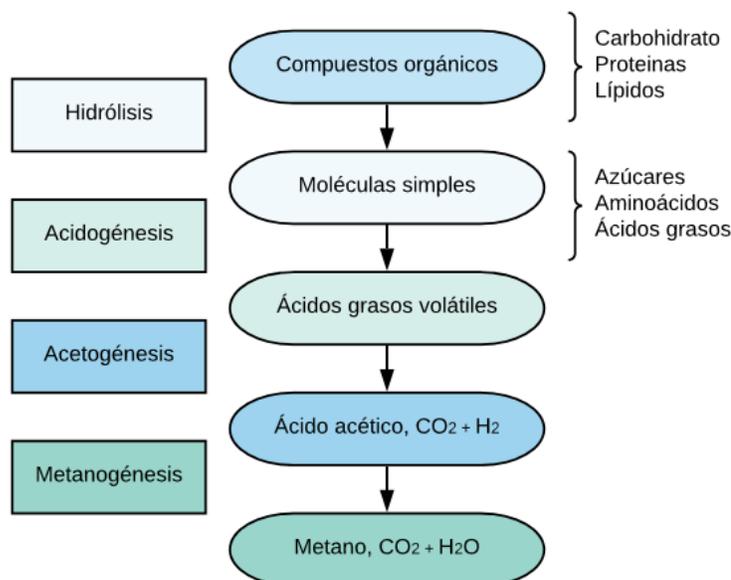


Figura 1. Síntesis proceso de digestión anaerobia y sus cuatro fases representativas. Adaptado de (Varjani , Gnansounou, Baskar, Pant, & Akmar Zakaria, 2018)

Dentro de los factores que interfieren en el proceso de digestión anaerobia se encuentran:

Temperatura

Representa un factor limitante en las interacciones biológicas y de supervivencia que desarrollan las bacterias. Existen tres rangos de temperatura en los cuales se puede llevar a cabo la digestión anaerobia, el primero de ellos es psicrófilo con una temperatura menor a 25 °C, esta temperatura se caracteriza por la lenta descomposición y reducida producción de gas, en segundo lugar se encuentra el proceso mesofílico con temperaturas que van desde 25 a 40°C, en este rango se presentan rendimientos relativamente elevados de gas y estabilidad en el proceso de digestión anaerobia, además, es considerado el más estable por la gran variedad de microorganismos existentes capaces de resistir este rango de temperatura (Wahid & Islam Siddique, 2018). Por último el rango termofílico, de 45 °C a 60 °C, proporciona mayor tasa de descomposición del sustrato, aumenta la tasa de mortalidad de las bacterias patógenas, sin embargo, representa un gasto mayor de energía en el proceso y es más susceptible a presentar disturbios y variaciones en el modo de operación del biodigestor, incrementando la presencia de la fracción de amoníaco que inhibe el crecimiento de los microorganismos (Varjani , Gnansounou, Baskar, Pant, & Akmar Zakaria, 2018).

Relación Carbono/Nitrógeno

Los sustratos con una relación C / N óptima proporcionan nutrientes suficientes que permite que los microorganismos maximicen la producción de biogás. Una relación muy elevada de C/ N, es decir mucho carbono y poco nitrógeno, reduce la actividad metabólica, como consecuencia el carbono no es completamente degradado y el rendimiento del metano no alcanza su pico máximo (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010), en contraste, los valores más bajos de C / N incrementan la concentración de amoníaco que interrumpe el crecimiento microbiano. A partir de lo anterior, se hace necesario optar por una relación C/N

apropiada para el proceso de digestión anaerobia, siendo la más estable cuando esta se encuentra en un rango de 20 a 30 (Wahid & Islam Siddique, 2018).

pH

Variable que regula la coexistencia de los microorganismos y la estabilidad del proceso de digestión anaerobia. Se ha determinado un intervalo favorable para el desarrollo del proceso, a pesar de la diferencia de sensibilidad de pH de cada uno de los grupos de microorganismos presentes, este valor establecido va desde 6,5 a 7,5 (Cendales Ladino, 2011). El rango óptimo de pH para el funcionamiento de las bacterias fermentativas es de 5,0–6,0 y para las bacterias metanogénicas es de 6,5 – 8,0. El bicarbonato producido por las bacterias metanogénicas permite neutralizar la reducción de pH causado por las bacterias acidogénicas. Valores de pH menores a 5 son letales para las bacterias metanogénicas por la acumulación de ácidos orgánicos, por otro lado, valores de pH superiores a 8 son tóxicos para los microorganismos anaerobios, inhibiendo sus funciones biológicas, con altas concentraciones de amonio que impide la acidogénesis (Varjani , Gnansounou, Baskar, Pant, & Akmar Zakaria, 2018)

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Se conoce como la cantidad de tiempo requerido por los microorganismos para el consumo y síntesis del sustrato, un tiempo largo de retención puede generar la muerte de microorganismos debido a la escasez de nutrientes, además incrementa la generación de ácidos grasos volátiles, y alcalinidad en el proceso. Por otro lado, un tiempo menor que el tiempo de crecimiento microbiano, puede causar daños en el proceso de digestión anaerobia puesto que no actuaría en coordinación con el crecimiento de la población bacteriana participante. El tiempo óptimo de retención hidráulica para la conversión biológica completa con digestión anaerobia en temperatura mesofílica es de 15 a 30 días (Horan, Yaser, & Wid, 2018).

Inóculo

El proceso de inoculación corresponde a la adición de microorganismos capaces de descomponer el sustrato contenido en el digestor, en donde se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia, usualmente se opta por inoculantes microbianos provenientes de tratamiento anaerobio estabilizado, que les permita adaptarse al tipo de sustrato y posicionarse en un estado de equilibrio para el inicio del proceso de digestión, esto con el fin de reducir el tiempo de retención hidráulica del proceso y asegurar que la máxima producción de metano se obtenga en tiempos reducidos (Nakasima-López , Taboada-González, Aguilar-Virgen, & Velázquez-Limón, 2017).

Asimismo, la selección del inóculo se convierte en uno de los factores determinantes en el óptimo desarrollo y desempeño del proceso de digestión, considerado como herramienta indispensable para la producción eficiente de biogás y metano (Ferrer & Pérez, 2010). Como se menciona anteriormente, se recomienda que el inóculo a elegir provenga de condiciones similares a la que este será sometido, de esta manera se reduce el periodo de adaptación de

los microorganismos participantes, una de las fuentes ampliamente utilizadas en el desarrollo de estos procesos, son los lodos anaerobios digeridos de plantas de tratamiento de agua residual.

De manera específica, en el presente proyecto, se utiliza como inóculo, el lodo anaerobio digerido procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Salitre, ubicada en Bogotá, Colombia. Este lodo digerido se obtiene al finalizar operaciones normales de digestión en un reactor anaerobio de mezcla de homogenización completa, que funciona a 32°C, con un tiempo de retención hidráulica de 19 a 22 días. A continuación, se muestran las características fisicoquímicas de este tipo de inóculo:

Tabla 6. *Caracterización fisicoquímica lodo digerido PTAR Salitre*

Parámetro	Unidad	Valor
Sólidos Totales (ST)	gSV/L	37,64
Sólidos Fijos (SF)	gSF/L	14,90
Sólidos Volátiles (SV)	gSV/L	22,74
Alcalinidad	mg/L	1.290
pH	Unidades de pH	6,3

Fuente: Adaptado de Cendales (2011)

Cabe mencionar que, para el desarrollo del proceso de digestión anaerobia, se sugiere utilizar un lodo con actividad metanogénica específica (AME) comprendida entre (0,05 y 1,2 gDQO/gSSVdía), como lo menciona Cendales (2011), quien al evaluar la AME del lodo anaerobio digerido de la PTAR Salitre asegura que este presentó un valor de 0,1 gDQO-CH₄/gSSVdía, valor que se encuentra dentro del rango favorable para el desarrollo del proceso anaeróbico Cendales (2011).

Configuración del reactor

Dentro de los reactores anaeróbicos más utilizados para el proceso de digestión anaerobia, se encuentran: el reactor Batch o por lotes y el reactor de flujo continuo. Sin embargo, existe el reactor semicontinuo, que combina la técnica de flujo continuo con un sistema de almacenamiento, en el cual ingresa mínimo una carga diaria de sustrato, este tipo de reactor no es ampliamente utilizado debido a limitaciones técnicas y económicas que este presenta por sus requerimientos operacionales y equipos como los reservorios de biofertilizantes y almacén de biogás (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

El reactor Batch, se caracteriza por el régimen de alimentación discontinua en donde el sustrato permanece en el biodigestor, hasta finalizar, el tiempo de retención hidráulico seleccionado (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010), es decir, el sustrato se carga dentro del reactor por una única vez y posterior a esto se sella. Como lo menciona Aydin (2017) “en este tipo de reactor, los pasos metabólicos de la digestión anaeróbica se producen de forma secuencial, comenzando con la hidrólisis, seguido por la acidogénesis y acetogénesis y termina en la producción de metano” (p.7).

Por otro lado, en el reactor de flujo continuo, se realiza una carga frecuente de material

orgánico y se elimina de manera habitual el biogás y digestato producidos. Todos los pasos de las reacciones anaerobias suceden de forma simultánea, las actividades de las comunidades acetogénicas y metanogénicas son aproximadamente iguales, se produce metano y no hay acumulación de ácidos grasos (Aydin, 2017).

Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Según Amani, Nosrati, Mousavi, & Kermanshahi (2011), los ácidos grasos volátiles (AGV) son los intermediarios de mayor importancia en el proceso de digestión anaerobia, son producidos a partir de cualquier tipo de biomasa, excepto de sus partes inorgánicas (Park, et al., 2015). Es importante mencionar, que “Están asociados a ácidos grasos de cadena larga o ramificada, lo que puede prolongar los tiempos de hidrólisis y adaptación microbiana” (Orobio, Lozada, Rebellón, Cleves, Franco, López, & Andrade, 2014, p. 557).

La acumulación de los AGV, indica que el proceso de digestión anaerobia presentó condiciones desfavorables o desequilibradas. La concentración de AGV individual, especialmente el ácido acético, propiónico y butírico, indica el estado metabólico de los grupos microbianos más delicados del sistema anaeróbico: los acetógenos productores de hidrógeno obligados y los metanógenos acetoclásticos (Henrysson, Mattiasson, & Björnsson, 1997).

Alcalinidad

Según Cendales (2011), la alcalinidad: “Representa las interacciones entre los aniones y los cationes presentes en el medio anaeróbico y los iones hidronio e hidróxido los cuales tienen incidencia directa sobre el valor del pH” (p.9). Es importante mencionar, que el pH de un sistema anaeróbico, bajo condiciones óptimas de operación, es controlado por la alcalinidad natural del sistema. De esta manera, es a partir de la descomposición de la materia orgánica, que se libera amoníaco, compuesto que reacciona con el dióxido de carbono para producir bicarbonato de amonio, contribuyendo así a la alcalinidad del sistema. Además, es la alcalinidad, el parámetro que neutraliza la acumulación de AGV y estabiliza el pH, en los procesos de digestión que ocurren en los reactores anaeróbicos (Varnero, 2011).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es definida por Cendales (2011) como: “la cantidad de oxígeno necesario para realizar la oxidación del material orgánico biodegradable y otros compuestos susceptibles a ser oxidados, los cuales se encuentran contenidos en una muestra determinada” (p. 63). En adición, la DQO, es un parámetro que permite estimar el contenido orgánico en agua residual (Zupancic & Ros, 2011), es esencial para el análisis de la biodegradabilidad de los residuos y evaluación de los balances de energía y monitoreo en los procesos de digestión anaerobia (Cazaudehore, Schraauwers, Peyrelasse, Lagnet, & Monlau, 2019).

Sólidos Totales (ST)

Los sólidos totales representan un parámetro importante para asegurar el desarrollo adecuado del proceso de digestión anaerobia. Lo anterior, puesto que la eficiencia y la producción del biogás depende de la capacidad de las bacterias metanogénicas para movilizarse dentro del sustrato, movilidad que se ve limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos. Se ha demostrado que la carga en reactores semicontinuos debe estar en un rango de 8 a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, por otro lado, los reactores discontinuos o tipo Batch, pueden tener entre un 40 a 60% de sólidos totales (Varnero, 2011).

Sólidos Volátiles (SV)

Los sólidos volátiles, representan la fracción de materia orgánica o materia seca presente en el sustrato o inóculo, capaz de transformarse en metano, al someterse a un proceso de digestión anaerobia. La eficiencia de la producción de biogás se expresa de acuerdo con el volumen de biogás producido por unidad de peso de SV. La fermentación de biogás requiere de un rango de concentración de materia seca que usualmente va de 1% al 30% (Varnero, 2011).

A continuación, se presenta un esquema de síntesis del proceso de digestión anaerobia, sus etapas y participantes:

Tabla 7. Síntesis de las etapas del proceso de digestión anaerobia y microorganismos participantes.

Fase	Descripción	Bacterias participantes	Productos
Hidrólisis	Conversión de compuestos orgánicos complejos en sustancias más simples a través de enzimas (celulasa, proteasa y lipasa) producidas por las bacterias facultativas permitiendo la asimilación de la materia orgánica por los microorganismos.	<u>Bacterias hidrolíticas: Clostridium y Bacteroides</u>	Aminoácidos, azúcares simples y ácidos grasos de cadena larga.
Acidogénesis	Las moléculas simples obtenidas en la hidrólisis son utilizadas como sustrato por bacterias productoras y metabolizadas formando múltiples ácidos.	<u>Bacterias fermentativas acidogénicas: Clostridium spp Lactobacillus y Bacillus</u>	Acetato, ácidos orgánicos (Propionato, Butirato, ácido valérico, ácido fórmico, láctico), amoníaco, CO ₂ , H ₂ .
Acetogénesis	Aceleración de los procesos metabólicos bacterianos, se produce la transformación enzimática, de lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, en compuestos que actuaran como fuentes energéticas y transformadoras a carbono celular.	<u>Bacterias acetogénicas: Syntrophobacter wolinii Syntrophomonas wolfei, Clostridium aceticum, Clostridium formicoaceticum y Acetobacterium wooddi</u>	Ácido acético, dióxido de carbono e hidrogeno
Metanogénesis	Conversión anaerobia de materia orgánica, transformación del acetato, o hidrogeno y el dióxido de carbono en metano, el ácido acético es uno de los responsables de la generación del 70% de gas metano.	Bacterias metanogénicas: Arqueas	Metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂), Agua (H ₂ O)

Fuente: Adaptado de Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010);Corrales, Antolinez Romero, Bohórquez Macías, & Corredor Vargas (2015) y Varjani , Gnansounou, Baskar, Pant, Akmar Zakaria (2018).

4.3 Marco normativo

4.3.1 Marco regulatorio para generación de biogás

Según la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) no se ha adoptado una regulación específica aplicable para este tipo de combustible. Sin embargo, en el documento CREG-056 *Regulación Aplicable al Biogás*, se analiza y desarrolla una propuesta sobre la regulación aplicable al biogás en el país (CREG, 2009).

Tabla 8. *Comunicaciones emitidas por la CREG sobre la generación de biogás.*

Comunicación	Objeto
S-2005-002805	Si el biogás recuperado se encuentra clasificado dentro de alguna de las 3 familias (1ª familia), gas natural (2ª familia) y al Gas Licuado del Petróleo – GLP (3ª familia) definidas en la resolución 11, se le aplicaría toda la regulación allí contenida. En relación con los estándares de calidad en la prestación del servicio de gas natural por redes es importante considerar lo contenido en el párrafo 2 del Artículo 2 de la Resolución CREG 100 de 2003
S-2005-003205	Si el biogás se encuentra clasificado dentro de alguna de las 3 familias de gases combustibles, y si es utilizado para prestar el servicio público domiciliario de gas combustible, la regulación económica aplicable a dicho servicio será aquella adoptada por la CREG. La Comisión ha adoptado regulación aplicable al gas natural (2ª familia) y al Gas Licuado del Petróleo -GLP- (3ª familia) destinado a la prestación del servicio público domiciliario La regulación sobre transporte de gas combustible (ductos de alta presión), adoptada hasta el momento, es aplicable al gas natural (2ª familia) y al GLP (3ª familia).

Fuente: Comisión de regulación de energía y gas, 2009

Lo anterior indica que, si el biogás se encuentra clasificado dentro de alguna de las tres familias de gases combustibles, y si es utilizado para prestar el servicio público domiciliario de gas combustible, la regulación económica aplicable al servicio de biogás será aquella adoptada por la CREG. Sin embargo, en el año 2009 se lanzó una propuesta de Resolución de CREG 066 de 2009 en la cual se presenta un proyecto de resolución que tiene como fin

de regular el servicio público domiciliario de gas combustible con Biogás (CREG, 2009). A continuación, se describe la regulación de gas combustible adoptada por la CREG:

Tabla 9. *Regulación de gas combustible en Colombia adoptada por la CREG.*

Norma	Número	Año	Objeto
Resolución CREG	067	1995	Por la cual se establece el Código de Distribución de Gas Combustible por redes
Resolución CREG	071	1999	Por la cual se establece el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural- (RUT).
Resolución CREG	001	2000	Por la cual se establecen los criterios generales para determinar la remuneración del servicio de transporte de gas natural y el esquema general de cargos del Sistema Nacional de Transporte.
Resolución CREG	052	2000	Por la cual se modifica el valor del componente Cargo Estampilla Base por Transporte (<i>Eo</i>), de la fórmula tarifaria aplicable al servicio público domiciliario de Gases Licuados del Petróleo (GLP).
Resolución CREG	011	2003	Por la cual se adoptan los Estándares de Calidad en el servicio público domiciliario de gas natural y GLP en Sistemas de Distribución por redes de tubería.
Resolución CREG	066	2009	Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general que pretende adoptar la Comisión con el fin de regular el servicio público domiciliario de gas combustible con Biogás.

Fuente: Comisión de regulación de energía y gas, 2009

4.3.2 *Marco regulatorio para la generación de energías renovables en Colombia.*

En el marco normativo Colombiano la Ley 1715 de 2014, es la normativa más representativa para el desarrollo y promoción de la eficiencia energética y la utilización de Fuentes No Convencionales de Energías Renovables (FNCER) tanto en el SIN como en las ZNI del país, teniendo como objetivo la reducción de GEI y cumplir acuerdos internacionales. Además de incluir incentivos económicos que contribuyan con el logro de implementar este tipo de energías (Cámara de Comercio, 2016).

Tabla 10. Marco regulatorio para la generación de energías renovables en Colombia.

Norma	Número	Año	Objeto
Ley	142	1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
Ley	143	1994	Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.
Ley	629	2000	Por el cual se aprueba el “Protocolo de Kyoto de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997.
Ley	697	2001	Mediante el cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías renovables y otras disposiciones.
Ley	788	2002	Estableció una exención al impuesto de renta sobre los ingresos derivados de la venta de energía eléctrica generada a partir de residuos agrícolas, fuentes eólicas y biomasa.
Ley	1665	2013	Por medio de la cual se aprueba el “Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)”
Ley	1715	2014	Desarrolla una política pública para la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema energético nacional.

Fuente: Cámara de Comercio de Cali, 2016

4.3.3 Marco regulatorio referente al manejo de la especie retamo espinoso (*Ulex europeus*)

Como fue mencionado en el planteamiento del problema y justificación, la especie invasora retamo espinoso está ocasionando serias problemáticas ecológicas a los ecosistemas locales. Es por esto que desde el año 2008 se estableció la respectiva normativa que regula el control, prevención y manejo de esta especie.

Tabla 11. Regulación referente al manejo de la especie retamo espinoso (*Ulex europeus*)

Norma	Número	Año	Objeto
--------------	---------------	------------	---------------

Resolución	848	2008	Por la cual se regula la prevención, control y manejo de las invasiones de retamo espinoso (<i>Ulex europaeus L.</i>) y retamo liso (<i>Genista monspessulana (L.) L.A.S. Johnson</i>) en el territorio nacional
Resolución	469	2009	Por medio de la cual se prohíbe la plantación, trasplante, venta, distribución y comercialización de las especies Retamo Espinoso (<i>Ulex europaeus</i>) y Retamo Liso (<i>Teline monspessulana</i>) y se adoptan otras disposiciones.
Resolución	0684	2018	Por la cual se establecen lineamientos tanto para la prevención y manejo integral de las especies de retamo espinoso (<i>Ulex europaeus L.</i>) y retamo liso (<i>Genista monspessulana (L.) L.A.S. Johnson</i>) como para la restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de las áreas afectadas por estas especies en el territorio nacional y se adoptan otras determinaciones.

(Ríos, Hurtado & Solorza, 2013)

4.3.4 Marco regulatorio para la recolección de especímenes con fines investigativos

Finalmente, dentro del marco normativo del presente proyecto es necesario hacer mención a la normatividad relacionada con la recolección de especímenes con fines investigativos.

Tabla 12. Marco regulatorio para la recolección de especímenes con fines investigativos.

Norma	Número	Año	Objeto
Resolución	198	2016	La ANLA otorgó a la UNIVERSIDAD DEL BOSQUE, el Permiso Marco de Recolección de Especímenes de Especies Silvestres de la Diversidad Biológica con Fines de Investigación Científica no Comercial.

Fuente: (ANLA, 2017)

4.4 Marco Institucional

El proyecto se encuentra enmarcado bajo las siguientes instituciones nacionales y regionales:

Tabla 13. Instituciones nacionales y regionales bajo las cuales se encuentra enmarcado el proyecto. Autores

Institución	Descripción	Rol en el proyecto
La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA	Se encarga de garantizar la transparencia de los licenciamientos, permisos o tramites ambientales,	Permiso Marco de Recolección de Especímenes de especies silvestres de la diversidad



Fuente: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (2019)

requeridos por proyectos, obras o actividades con el fin de cumplir con la normativa ambiental, y de contribuir al desarrollo sostenible del País (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), 2019).

Biológica con fines de Investigación Científica No Comercial al Programa de Biología de la Universidad El Bosque bajo el cumplimiento del artículo SEXTO de la resolución 0198 del 29 de febrero de 2016, lo anterior para la recolección de la especie *Ulex Europaeus*, conocida como el retamo espinoso.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible



Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (2019)

Encargado de orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas de recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la nación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2019)

En el marco de la sostenibilidad de los recursos naturales renovables, se posiciona el tema de aprovechamiento energético de los materiales lignocelulósicos como los residuos agrícolas y las especies vegetales (retamo espinoso).

Comisión de regulación de Energía y Gas (CREG)



Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG- DRA (2017)

Se encarga de garantizar la calidad, cobertura y expansión de los servicios de energía eléctrica, gas natural, entre otros combustibles menor costo posible (Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG - DRA, 2017)

La CREG, ha elaborado Comunicaciones sobre la generación de biogás, regulación de gas combustible en Colombia, contenido que se ha tenido en cuenta como base para el desarrollo del proyecto.

La Unidad de Planeación Minero-Energética -UPME



Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética UPME (2017)

Se encarga de planear en forma integral el desarrollo y aprovechamiento de los recursos mineros y energéticos. Además de producir y divulgar la información requerida para la formulación de política y toma de decisiones (Unidad

Aporta normatividad relacionada con el uso de biogás y sus características del mismo modo promueve la generación de energías renovables no convencionales, grupo al que pertenece el

	de Planeación Minero Energética (UPME), 2017)	aprovechamiento energético de biomasa.
<p>Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR</p>  <p>Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2018)</p>	Representa la máxima autoridad ambiental en su jurisdicción, ejecutando políticas, planes, programas y proyectos ambientales, a través de la construcción de tejido social, para contribuir al desarrollo sostenible y armónico de la región (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), 2018)	La CAR, ha trabajado en estrategias regionales para el manejo del riesgo por invasión de Retamo Espinoso, del mismo modo provee publicaciones relacionadas con el tema e información adicional base para la formulación y desarrollo del presente proyecto.
<p>Ministerio de Agricultura y desarrollo Rural</p>  <p>Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) (2019)</p>	“Promover el desarrollo competitivo, equitativo y sostenible de los procesos agropecuarios forestales, pesqueros y de desarrollo rural, que contribuyan a mejorar el nivel y la calidad de vida de la población colombiana” (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), 2019)	Una de las líneas de investigación del proyecto es la Gestión para el desarrollo Urbano y Rural para el mejoramiento de la calidad de vida, a partir de la generación de alternativas energéticas para la población por medio de residuos agrícolas y especies vegetales. De esta manera, se hace relevante su participación.
<p>Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis</p>  <p>Fuente: Sistema de Información sobre Biodiversidad (SIB) (2019)</p>	Entidad responsable de la gestión integral de coberturas verdes en la Ciudad, del desarrollo de programas de educación ambiental y de la conservación y mantenimiento de colecciones vivas de flora (Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, 2019).	El jardín botánico en colaboración con diferentes entidades (CAR, Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria Distrital de Ambiente) a elaborado diferentes publicaciones de estrategias de manejo del retamo espinoso y restauración ecológica, información que ha servido de referencia para el desarrollo del proyecto.
<p>Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt</p>	Corporación civil sin ánimo de lucro vinculada al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Dado que la especie Invasora Retamo Espinoso, representa un riesgo en la funcionalidad



Fuente: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (2014)

(MADS). Genera el conocimiento necesario para evaluar el estado de la biodiversidad en Colombia y para tomar decisiones sostenibles sobre la misma (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2014)

de los ecosistemas naturales, su conocimiento y alternativas de control, generan interés e información adicional para la toma de decisiones para la conservación y sostenibilidad del territorio.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB



Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) (2019).

Empresa pública prestadora de los servicios de acueducto y alcantarillado sanitario y pluvial (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), 2019).

A través de su dirección Red Troncal Alcantarillado suministrará al equipo de trabajo muestras de lodo digerido de la PTAR El Salitre, y demás informaciones relevantes sobre sus características fisicoquímicas. Este lodo actuará como inóculo en el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás.

Universidad El Bosque UEB



Fuente: Universidad El Bosque (UEB) (2019)

Universidad de formación, multidisciplinaria, con un foco que articula su desarrollo en la Salud y Calidad de Vida. Insertada en el entorno global, comprometida con las necesidades y oportunidades locales, regionales y nacionales (Universidad El Bosque (UEB), 2019)

Proveedora de espacios de investigación, siendo estos los laboratorios de Química Ambiental del bloque F, en donde se ubicará el biorreactor y se realizarán pruebas de análisis de sólidos, pH, ácidos grasos volátiles y temperatura, de los materiales utilizados durante la elaboración del trabajo de grado.

Las instituciones descritas, son entidades relacionadas con los objetivos del proyecto, que de manera directa e indirecta participan en la elaboración de este. En cuanto a la recolección de las especies vegetales, específicamente “El retamo espinoso (*Ulex Europeaus*)”, la ANLA es la autoridad de participación directa, puesto que es quien otorga la autorización para recoger la especie objeto de estudio bajo los criterios de la resolución 0198 del 29 de febrero de 2016, del mismo modo, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB, otorga los protocolos necesarios para acceder a la PTAR el salitre, de donde se tomaran muestras de

lodos anaerobios, con el debido permiso y acuerdo de confidencialidad. Las demás entidades mencionadas generan, publicaciones, estrategias e información necesaria y de interés para el apoyo en la realización del proyecto.

4.5 Marco geográfico

Teniendo en cuenta que el objetivo general del presente proyecto de investigación no se enmarca ni se desarrolla para una zona en específico, es importante mencionar los territorios geográficos de los cuales fueron tomadas las muestras objeto de estudio (sustratos-inóculo), y así mismo el lugar donde se llevó a cabo toda la parte experimental siendo este los laboratorios de investigación de la Universidad El Bosque - Sede Usaquén. Dicho lo anterior, la recolección del rastrojo de maíz tomó lugar en Pasca, Cundinamarca; la de retamo espinoso en los cerros orientales de Bogotá; y la del lodo digerido en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre.

4.5.1 Finca de maíz Copa de los Ángeles, Pasca, Cundinamarca.

El municipio de Pasca, Cundinamarca se encuentra ubicado en la zona sur del departamento de Cundinamarca a una distancia aproximada de 71 kilómetros de Bogotá D.C. Su localización en coordenadas es 4° 18' 12'' de latitud norte y 74° 18' 12'' de longitud oeste a una altura de 2180 m.s.n.m., con una temperatura media de 15.2 grados centígrados y una precipitación media anual de 873 mm. Tiene un área total de 277 Km² (Delgado, 2009).



Limita geográficamente así:
Norte: Municipio de Fusagasugá
Sibate y Distrito Capital de Bogotá.
Sur: Municipio de Arbeláez
Occidente: Municipio de Fusagasugá
Oriente: Distrito Capital de Bogotá

Figura 2. Ubicación del municipio de Pasca, Cundinamarca. Fuente: Delgado, 2009

El área municipal es de 264.24 kilómetros cuadrados de los cuales 263.97 son rurales (99.9%) y 0.27% urbana según la distribución de la Jurisdicción Municipal, el municipio de Pasca está enmarcado por un ámbito netamente rural, que adjunto a su posición geográfica y a su gran oferta de recursos naturales lo jerarquiza como uno de los municipios más importantes de la región del Sumapaz y a su vez del Departamento de Cundinamarca (Alcaldía Municipal de Pasca, 2016).

La principal actividad económica del municipio es la agricultura y ganadería, constituyendo la vocación del municipio. El uso de los suelos para la actividad agraria se distribuye en: 25.5% para labores agrícolas 54.5% en pastos utilizados para la ganadería y 20% cubierto de

rastrojo. Dentro del sistema productivo agrícola a gran escala, los cultivos de papa, papa criolla, cebolla, arveja, frijol, maíz son los más representativos (Alcaldía Municipal de Pasca, 2016).

4.5.2 Cerros orientales de Bogotá

Los Cerros Orientales hacen parte de la cadena montañosa ubicada en la zona central de la cordillera Oriental colombiana, que atraviesa de sur a norte el Distrito Capital. Este accidente orográfico tiene gran importancia regional como barrera geográfica, corredor ecológico y zona de recarga de acuíferos, y es uno de los principales ecosistemas estratégicos de Bogotá (Ramírez, Mesa, García, & Valero, 2015, p. 22). Alcanzan una altitud de 3600 m.s.n.m., también corresponde a las zonas rurales de las localidades de Sumapaz, Usme, San Cristóbal, Santa Fe, Chapinero y Usaquén (Castro & Cervera, 2014).

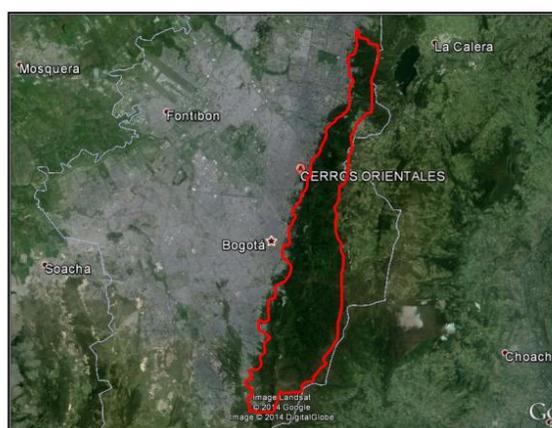


Figura 3. Delimitación de los cerros orientales de Bogotá. Fuente: Google Earth

Los cerros más importantes de esta conformación orográfica de sur a norte son; La Teta, Aguanoso, Guadalupe, Monserrate, Pico del Águila, El Cable y al norte de la ciudad, en la localidad de Usaquén, las sierra del Chicó, la cuchilla El Chiscal. El alto de Laguna y el cerro Pan de Azúcar (Castro & Cervera, 2014). Es pertinente mencionar que gran parte de su área está protegida dentro de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, que tiene un área aproximada de 13.224 hectáreas, de acuerdo con la resolución 076 de 1977 del Ministerio de Agricultura. Hace parte del corredor de conservación Chingaza, Sumapaz, Cerros Orientales y páramo de Guerrero, en el que se incluyen áreas protegidas como las reservas forestales Cuenca alta del río Bogotá y los parques nacionales naturales Chingaza y Sumapaz, enfocados en la sostenibilidad ambiental y el mantenimiento de la oferta hídrica en la región (Betancourt, Buitrago & Silva, 2015).

4.5.3 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre

La PTAR Salitre se encuentra ubicada en el noroccidente de la ciudad, entre las localidades de Suba y Engativá. En la planta se tratan las aguas residuales del sector Norte y Centro de Bogotá y una vez que el agua ha sido tratada, esta se vierte al Río Bogotá a la altura de la calle 80. Actualmente la PTAR Salitre tiene un tratamiento primario de 4 metros cúbicos de

agua por segundo, sin embargo, le llegan 15 metros cúbicos por segundo producido por cerca de 3 millones de habitantes de Bogotá (CAR, 2018).



Figura 4. PTAR El Salitre. Fuente: Google Earth

4.5.4 *Universidad El Bosque – Sede Usaquén*

La Universidad El Bosque es una institución privada de educación superior fundada el 27 de julio de 1977, conocida en ese entonces como Escuela Colombiana de Medicina. Actualmente cuenta con 112 programas académicos, dentro de los cuales 28 son programas de pregrado, 84 de posgrados, 3 doctorados, 14 maestrías y 67 especializaciones. Presenta una población estudiantil de 12.213 estudiantes dentro de los cuales el 67% hace parte de programas acreditados y cuenta con un talento humano de 1.719 docentes y 450 administrativos. La Universidad El Bosque cuenta con dos campus, su campus principal se encuentra ubicado al norte de Bogotá en la localidad de Usaquén y el segundo se encuentra ubicado en Chía, Cundinamarca. La sede principal cuenta con aulas, auditorios, salones de seminario, laboratorios, biblioteca y dentro de actividad física el Centro de Desarrollo de Informaciones y Tecnologías y el Centro Cultural (Universidad El Bosque, 2018)



Figura 5. Instalaciones Universidad El Bosque-Sede Usaquén. Fuente: Universidad El Bosque.

5 Diseño metodológico

5.1 Alcance

El proyecto de investigación se enmarca en dos tipos de alcance, estos son: Explicativo y Correlacional. El alcance explicativo, centra su interés en establecer las causas de los fenómenos que se estudian, así como las condiciones en las que estos se manifiestan buscando explicar la relación de dos o más variables involucradas (Hernández Sampieri, 2014). De esta manera, se busca explicar la diferencia o semejanza existente en la producción de metano de los sustratos objeto de estudio (Retamo Espinosa y Rastrojo de Maíz), a partir del proceso de digestión anaerobia, analizando variables como el pH, producción de biogás, metano, la composición de los sustratos e inóculo participantes (ST, SV, SF, AGV, Alcalinidad, DQO).

Por otro lado, según Hernández Sampieri (2014) “el alcance correlacional tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más variables en una muestra o contexto en particular” (p.126). De tal forma, a partir del proyecto de investigación se busca identificar el vínculo existente entre las variables que intervienen durante el proceso de digestión anaerobia y producción de metano, en los sustratos seleccionados. En ocasiones sólo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio vínculos entre tres, cuatro o más variables. Para evaluar el grado de asociación dichas variables es necesario realizar mediciones de cada una de estas, cuantificarlas, analizarlas y posteriormente establecer vínculos. Tales correlaciones se sustentan en hipótesis sometidas a prueba (Hernández Sampieri, 2014).

5.2 Enfoque

El proyecto se clasifica como un estudio de enfoque cuantitativo, al ser un conjunto de procesos en el cual cada etapa precede a la siguiente y no se puede saltar o eludir pasos del proceso. En este caso la digestión anaerobia como proceso central, con el fin de producir biogás, específicamente metano a partir de diferentes sustratos, compartiendo el mismo inóculo. El orden es riguroso, surge de una idea que se va delimitando, de allí se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco de referencia. De las preguntas se establecen hipótesis y se determinan variables; se traza un plan para probarlas se miden las variables del contexto seleccionado; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones respecto de la o las hipótesis (Hernández Sampieri, 2014). La importancia de este enfoque yace en las hipótesis cuyo establecimiento debe hacerse antes de la obtención de resultados, puesto que estos representan la prueba de éxito al ser comprobadas o índice de cambios o mejoras al ser refutadas.

5.3 Método

El proyecto de investigación se enmarca en los métodos analítico y sintético. Gutiérrez Sánchez (1990) citado por Maya (2014, p.13), define el método analítico como: “el método que distingue las partes de un todo y procede a la revisión ordenada de cada uno de los elementos por separado”, de este modo, a partir del reconocimiento de las etapas de

funcionamiento de la digestión anaerobia, se realizará el monitoreo y revisión de las diferentes variables que influyen en el desempeño de la producción de metano, variables que se analizarán en los diferentes ensayos de laboratorio. Por otro lado, el método sintético: “analiza y sintetiza la información recopilada, lo que permite la estructuración de las ideas” (Maya, 2014, p.13), asimismo, a partir del previo análisis de las variables involucradas en la digestión anaerobia de los sustratos utilizados (Rastrojo de Maíz, Retamo Espinoso), se procederá a consolidar los datos obtenidos, justificando la información recopilada al finalizar los ensayos y al seleccionar el sustrato de mayor producción de biogás y metano.

5.4 Metodología

5.4.1 Objetivo 1.

Caracterizar las propiedades físicas y químicas del rastrojo de maíz, retamo espinoso y lodo digerido para iniciar el proceso de digestión anaerobia en el Biorreactor Batch.

Para la realización del primer objetivo fue necesaria la recolección de 1 kg rastrojo de maíz, 1 kg de retamo espinoso y 5 L de lodo digerido en cada visita a la PTAR Salitre. Con respecto al rastrojo de maíz, se realizó una visita al municipio Pasca, Cundinamarca, a la finca Copa de los Ángeles ubicada en la vereda Alto del Molino. Para el retamo espinoso, la colecta se realizó en los cerros orientales de Bogotá (Monserrate) y el lodo digerido en la PTAR Salitre. Así mismo, es pertinente mencionar la realización del ajuste del biorreactor en términos de funcionamiento, la toma y almacenamiento de los datos, así como la calibración de los sensores MQ4 (metano), MQ2 (volumen del gas) y la sonda de pH biorreactor.

Una vez realizado lo anterior, el objetivo se basó en realizar la caracterización física y química del inóculo y sustratos utilizados en el Laboratorio de Aguas de la Universidad El Bosque, lo cual permitió definir las condiciones de entrada de estos, así como también definir la razón de carga para iniciar el proceso de digestión anaerobia en el biorreactor Batch. Para el inóculo, se realizaron pruebas de análisis de sólidos (ST, SF, SV), pH, DQO, AGV y alcalinidad. Los análisis de sólidos resultan determinantes para asegurar que el proceso se desarrolle de manera satisfactoria, puesto que a medida que se va presentando un aumento en el contenido de sólidos, la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve limitada, afectando la eficiencia de la producción de biogás. El pH permite saber en qué estado de acidez o basicidad se encontraba el sustrato e inóculo empleado (Varnero, 2011), la DQO resulta un parámetro pertinente al ser la cantidad de oxígeno necesaria para realizar la oxidación del material orgánico biodegradable y otros compuestos susceptibles a ser oxidados, los cuales se encuentran contenidos en una muestra determinada (Cendales, 2011). Finalmente, los AGV y la alcalinidad son determinantes a la hora de evaluar el proceso de digestión anaerobia al presentar una significativa influencia en la alteración del pH del proceso (Varnero, 2011).

Con respecto al sustrato se realizaron análisis de sólidos, pH, humedad, nitrógeno orgánico (N Orgánico), nitrógeno total (NT) y carbono orgánico oxidable total (COOx). Las pruebas de carbono y nitrógeno permiten tener conocimiento sobre la composición y la naturaleza en la que se encuentra el sustrato, teniendo en cuenta que estos elementos son la fuente de

alimentación primaria para las bacterias metanogénicas (Varnero, 2011). Una vez realizado todo lo anterior se procedió a iniciar el proceso de digestión anaerobia.

A continuación, se presenta el esquema que sintetiza la metodología para el primer objetivo:

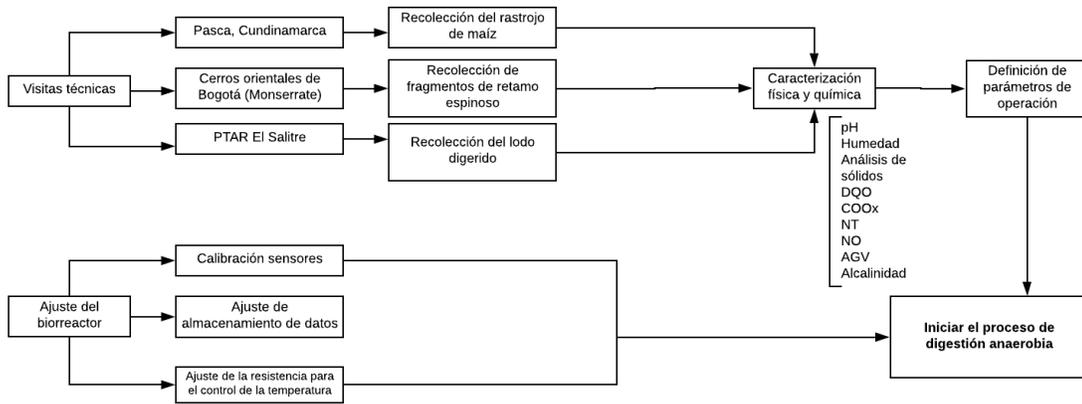


Figura 6. Metodología empleada para la realización del Objetivo 1. Autores

5.4.2 Objetivo 2.

Comparar la producción de metano de la digestión anaerobia del retamo espinoso y del rastrojo de maíz en el biorreactor Batch para seleccionar la combinación de mayor porcentaje de metano.

Para el cumplimiento del objetivo 2, se inicia el proceso de digestión anaerobia con el blanco o ensayo patrón, es decir con el inóculo o lodo digerido, enseguida, continua el proceso con el ensayo 2, compuesto por lodo digerido y rastrojo de maíz como el sustrato, se termina con el ensayo 3, cuyo sustrato es el retamo espinoso y su inóculo continúa siendo el lodo digerido. Cada ensayo tiene una duración aproximada de 19 días, por cuestiones de tiempo de realización de la practica experimental del proyecto, no se realizan pruebas por duplicado o triplicado con diferentes proporciones del sustrato, sin embargo, se define la proporción a utilizar a partir de los sólidos volátiles y volumen útil del biorreactor, durante este periodo se realizan monitoreos diarios de pH, control de temperatura, producción de biogás y metano. Además, se toman muestras iniciales y finales en cada ensayo con el fin de realizar los análisis de DQO, Sólidos totales (ST), Sólidos fijos (SF), sólidos volátiles (SV), ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad, con el fin de analizar la composición de entrada y salida de la carga en el reactor.

Al finalizar los periodos de ejecución de los ensayos de digestión anaerobia en el biorreactor Batch y los análisis de laboratorio correspondientes, se inicia la recolección de la información, su organización y elaboración de gráficas para su posterior análisis y evaluación a partir de la cual se compara los valores obtenidos y selecciona el conjunto de inóculo sustrato de mayor producción de metano.

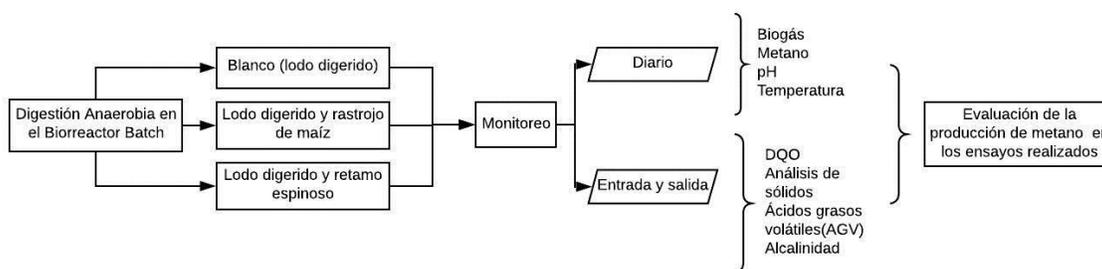


Figura 7. Metodología empleada para la realización del Objetivo 2. Autores

5.5 Técnicas e instrumentos

5.5.1 Objetivo 1

Calibración sonda de pH

Para la calibración de la sonda de pH se calculó la conversión del voltaje que mide el sensor, utilizando como valores de referencia las soluciones buffer de pH 4.0, 7.0 y 10.0

Tabla 14. Valores para el ajuste y calibración de la sonda de pH.

pH	Voltaje (V)
4,0	354
7,0	420
10,0	451

Autores.

Una vez realizada la medida del voltaje de acuerdo con las soluciones buffer de pH utilizadas se procedió a realizar la gráfica para obtener la ecuación lineal de la recta $y = mx + b$, donde y va a ser igual al valor de pH.

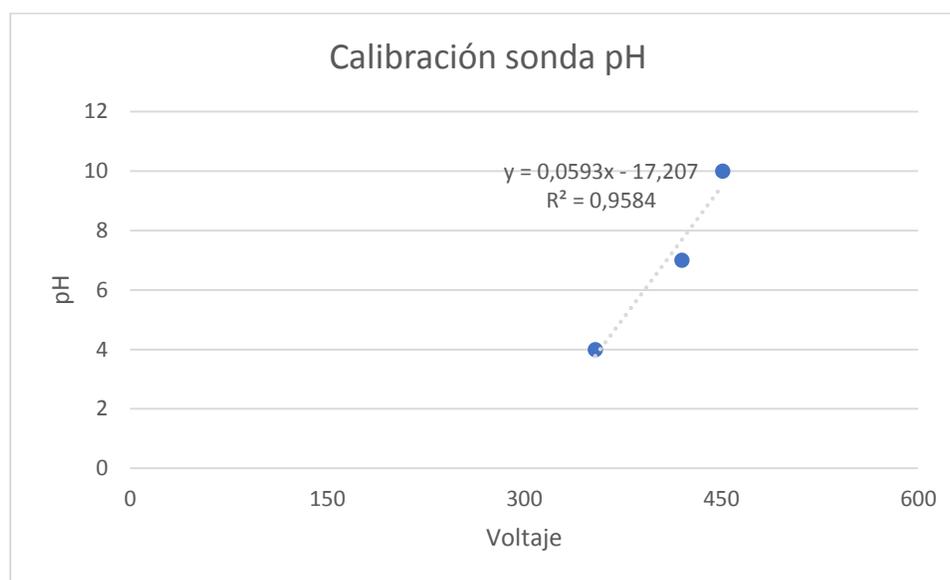


Figura 8. Gráfica de calibración de la sonda pH. Autores

Calibración sensor MQ4 (Metano)

Al efectuar el cambio del sensor de metano fue necesario realizar la calibración en base a lo reportado en el manual de biorreactor (Pérez, s.f., p. 25) en el cual se menciona que, aunque idealmente es necesario contar con un equipo industrial que permita comparar los valores entre el sensor MQ-4 usado y los valores del equipo, el sensor, posee un datasheet donde el fabricante asegura los rangos de operación y entrega la ecuación de calibración del sensor.

“Basados en dicha gráfica y la ecuación, se realizó la curva de calibración del sensor MQ-4. Donde se toma el dato de Rs de saturación del sensor y se igualará al valor en 10.000ppm que es el valor en el cual el fabricante asegura saturación. Luego se despeja R0 que es una constante para la cual Rs/R0 sea igual el valor que da el datasheet. A partir de estos valores y la ecuación interpretada desde el datasheet se realiza la calibración del instrumento. Mediante la interpretación de los datos del fabricante (Henan Hanwei Electronics), se determina una pendiente $b=-0,318$ y una Y-intersección $M= 1,133$. El valor obtenido de R0 en el programa anterior fue de 11.820 (Geekstips, 2018)” (Pérez, s.f., p. 25).

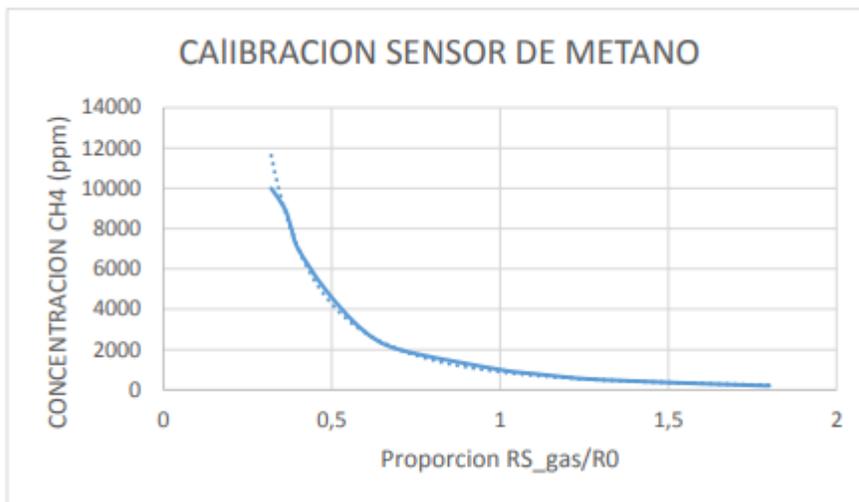


Figura 9. Calibración del sensor de metano. (Pérez, s.f., p. 27)

Caracterización física y química del inóculo y sustratos

Para realizar la caracterización de los parámetros COOx, NT y N Orgánico, se contrató los servicios del laboratorio AGRILAB LTDA, los cuales desarrollaron la caracterización teniendo como referencia la NTC 5167 (Segunda actualización) para productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Y la NTC 370 (Cuarta actualización) para abonos o fertilizantes, determinación de nitrógeno total. En la tabla que se muestra a continuación se describe la variable, el extractante, la técnica y la referencia utilizada.

Tabla 15. Técnicas y referencias utilizadas por el Laboratorio AGRILAB LTDA.

Variable	Expresión / Sigla	Extractante / Técnica / Referencia
Carbono Orgánico Oxidable Total	COOx	Sin Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167
Nitrógeno Total	NT	Sumatoria de especies de nitrógeno
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	Micro-Kjeldahl / Volumétrico / NTC 370

- *Carbono Orgánico Oxidable Total (COOx)*

Para la determinación del COOx el método comúnmente utilizado es el de Walkley y Black (1984), este se basa en una oxidación húmeda para determinar el contenido de CO en el suelo, una vez producida la oxidación se puede determinar el contenido de CO por medio de los siguientes métodos: titulación usando indicadores de color, titulación potenciométrica y colorimetría. Para este caso, el laboratorio contratado utilizó este último y es pertinente resaltar que este método es el más preciso y usa menos reactivos que los otros métodos, consiste en que el ácido crómico producido durante la oxidación se puede leer a 620 nm usando patrones de sacarosa (McKean, 1993).

El procedimiento se basa en colocar en un Erlenmeyer 0,30 g de muestra, posteriormente se agrega 10 mL de dicromato de potasio 0,17 M y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado, agitando vigorosamente durante un minuto. Se deja en reposo hasta alcanzar temperatura ambiente (aproximadamente 30 min), luego de esto se completa un volumen de 150 mL con agua destilada, y se agita de nuevo. Se dejó decantar y enfriar durante dos horas y el sobrenadante se transvasó a los tubos de ensayo, se deja en reposo de un día para otro y se determinó la absorbancia a una longitud de onda de 585 nm ajustando el equipo con un blanco de reactivos (McKean, 1993).

- *Nitrógeno Total - Nitrógeno Orgánico (N Orgánico) - Método Kjeldahl*

El método Kjeldahl se utiliza para la determinación del contenido de nitrógeno en muestras orgánicas e inorgánicas. Consta de tres etapas siendo estas: la digestión, destilación y valoración.



Figura 10. *Etapas del método Kjeldahl.* Adaptado de (ITWReagents, 2018)

En la digestión se produce un rompimiento de todos los enlaces de nitrógeno de la muestra para ser unido orgánicamente en iones amonio. El objetivo del procedimiento de digestión es romper todos los enlaces de nitrógeno de la muestra y convertir todo el nitrógeno unido orgánicamente en iones amonio (NH_4^+) (ITWReagents, 2018)

El carbono orgánico y el hidrógeno forman dióxido de carbono y agua. En este proceso la materia orgánica se carboniza dando lugar a la formación de una espuma negra. Durante la digestión, la espuma se descompone y finalmente se convierte en un líquido claro que indica que la reacción química ha terminado. Para ello, la muestra

se mezcla con ácido sulfúrico a temperaturas entre 350 y 380 °C. Cuánto más alta sea la temperatura, más rápido será el proceso de digestión. La digestión también se puede acelerar con la adición de sales y catalizadores. Se añade sulfato de potasio para aumentar el punto de ebullición del ácido sulfúrico y se añaden catalizadores para aumentar la velocidad y la eficiencia del procedimiento de digestión. También se pueden añadir agentes oxidantes para mejorar aún más la velocidad (ITW Reagents, 2018, p. 2).

En la destilación los iones amonio (NH_4^+) se convierten en amoníaco (NH_3) mediante la adición de un álcali (NaOH). El amoníaco (NH_3) es arrastrado al vaso receptor por medio de una corriente de vapor de agua. El vaso receptor para el destilado se llena con una solución absorbente para capturar el gas amoníaco disuelto. Finalmente se realiza la valoración para determinar la concentración de los iones amonio (ITW Reagents, 2018).

- Ácidos Grasos Volátiles y Alcalinidad

Antes de iniciar el procedimiento de determinación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad, es necesario estandarizar las soluciones que se van a utilizar (NaOH 0,1M y HCl 0,1M):

Estandarización de la solución de NaOH 0.1M

Para la preparación de la solución de NaOH 0.1M, se disuelven 4,0g de Hidróxido de sodio puro en agua destilada hasta completar 1L de solución (Morita & Assumpção, 2001). Con el fin de realizar la estandarización de la solución, se pesan de 2,0 a 4,0 gramos de biftalato de potasio en una cápsula, luego, se deja en la estufa durante dos horas a una temperatura de 110°C, al finalizar, se ubica en el desecador para retirar la humedad restante, y se pesa, restando el valor correspondiente al recipiente. En seguida, se dispone la masa del biftalato en un Erlenmeyer de 100mL, completando a volumen con agua destilada y se disuelve completamente. Al finalizar, se ubica el montaje requerido para la titulación, con la solución de NaOH 0,1M en la bureta, se adicionan 5 gotas de fenolftaleína, y se inicia el procedimiento, en el momento en el que la solución de biftalato tome el color rosa persistente, se cierra la titulación y se anota el volumen gastado de NaOH 0,1M (Morita & Assumpção, 2001).

A continuación, se presenta la ecuación correspondiente para rectificar la concentración de la solución de NaOH 0,1M preparada:

$$Mb = \frac{ma \times 1.000}{Vb \times 204,22 \times Mbt}$$

Ecuación 1. Concentración NaOH

Donde:

ma: masa de biftalato (g)

Vb: volumen gastado de solución NaOH 0,1M (mL)

Mb: molaridad teórica de la solución de NaOH (M)

Mbt: molaridad teórica de la solución de NaOH (M)

Estandarización de la solución de HCl 0,1M

Para la preparación de la solución de HCl 0,1M, necesaria para la determinación de los Ácidos grasos volátiles y Alcalinidad, se inicia con la adición de una capa de agua destilada de aproximadamente 100 mL en un balón volumétrico de 1000mL, en seguida se adicionan 8,5 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrado y se completa a volumen con agua destilada, se agita el balón volumétrico con el fin de homogeneizar la solución. Para comprobar, que la solución preparada corresponde a la concentración indicada, se realiza una titulación con NaOH 0,1M (Morita & Assumpção, 2001). Para lo cual, se inicia tomando un 5mL de la solución de HCl preparada, en seguida, se transfiere a un Erlenmeyer de 100mL y se completa a volumen con agua destilada, simultáneamente se transfiere a una bureta, la solución de NaOH 0,1 M, realizada previamente para iniciar la titulación, siguiendo el mismo procedimiento descrito para la estandarización de la solución de NaOH 0,1M, del apartado anterior.

A continuación, se presenta la ecuación correspondiente para rectificar la concentración de la solución de HCl 0,1M preparada:

$$Ma = \frac{Mb \times Vb}{Va}$$

Ecuación 2. Concentración HCl

Donde:

Ma: masa de biftalato (g)

Mb: molaridad teórica de la solución de NaOH

Vb: volumen gastado de solución NaOH 0,1M

Va: Volumen de ácido HCl 0,1M

Al finalizar, las estandarización de las soluciones anteriores, se inicia el proceso de determinación de AGV y alcalinidad como se describe a continuación:

Para la medición de los AGV y Alcalinidad se utilizó el método de titulación, método por el cual se determina el bicarbonato y los ácidos grasos volátiles en soluciones acuosas. Como primera medida, se tomó 80 mL de la muestra objeto de estudio y se procedió a centrifugarse durante 30 minutos a 5000 rpm. Se tomaron 50 mL de la muestra clarificada y se completó con agua destilada a un volumen de 100 mL. Se inició el proceso de titulación con HCl 0,1 M hasta alcanzar un pH de 4,3. Seguido a esto, con el mismo HCl se lleva un pH de 3,5, a este pH, el bicarbonato será convertido en CO₂ y los AGV estarán presentes en solución de forma no ionizada. Posteriormente, se procedió a calentar la muestra a punto de ebullición durante 3 minutos con el fin de remover el CO₂ presente y preservar los AGV que han sido volatilizados por condensación., y finalmente se procedió a iniciar la titulación con NaOH 0,1 M hasta un pH de 7,0. Los AGV será convertidos a su forma disociada (Díaz, Espitia & Molina, 2002).

Para el cálculo de la alcalinidad de empleó la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad (mg CaCO}_3\text{/L)} = \frac{V_{\text{HCl}} * ([0,1 \text{ M}]) * (50.000 \text{ mg CaCO}_3)}{V_{\text{muestra}}}$$

Ecuación 3. Alcalinidad

Para el cálculo de los AGV se empleó la siguiente ecuación:

$$\text{AGV (mg CH}_3\text{COOH /L)} = \frac{V_{\text{NaOH}} * ([0,1 \text{ M}]) * (60.000 \text{ mg CH}_3\text{COOH})}{V_{\text{muestra}}}$$

Ecuación 4. AGV

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para la realización de la DQO, se contó con la ayuda de la Química Industrial, Yolima Guzmán, con cargo de analista química en los laboratorios de la PTAR El Salitre. El método que reportó para la realización de esta prueba fue el método 5220 C del Standard Methods, en el cual se realiza la digestión de la muestra diluida durante dos horas con un exceso de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en un medio fuertemente acidificado mediante la adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Para esto, se utiliza un bloque de digestión con tubos de ensayo especiales para resistir altas presiones y temperaturas del orden de 150°C . El exceso de dicromato de potasio es valorado mediante la titulación con sulfato ferroso amoniacal (FAS) [0.10 M], mediante la utilización de un titulador automático. En cada grupo de muestras se realiza un blanco consistente de agua destilada sobre la cual se realiza la adición del dicromato de potasio y el ácido sulfúrico, además se realiza un estándar reemplazando la muestra por biftalato de potasio ($\text{C}_8\text{H}_5\text{O}_4$) para realizar el ajuste o estandarización de la concentración del agente titulante FAS (Baird, Eaton, & Clesceri, 2012). La DQO se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{DQO (mg O}_2\text{/L)} = \frac{(A - B) * (M) * 8.000}{\text{Volumen de la muestra (mL)}}$$

Ecuación 5. DQO.

Donde:

A: Es el volumen de FAS consumido en la titulación del blanco.

B: Es el volumen de FAS consumido en la titulación de la muestra.

M: Es la molaridad del FAS (0,1M)

8.000: Es el factor que representa los miliequivalentes del peso del oxígeno x 1.000 ml/L

- Humedad

La determinación de humedad se realiza a partir de la técnica de gravimetría a 100°C , teniendo como referencia la NTC 5167 (Segunda actualización) para productos de la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Se inicia, pesando 50g de la muestra sólida a utilizar (Rastrojo de maíz y retamo espinoso), se transfieren a un vidrio reloj y enseguida se pone en estufa a

100°C durante una hora o hasta que se obtenga peso constante, entre dos pesadas sucesivas. Transcurrido el tiempo asignado, se retira el material de la estufa y se deja a enfriar en el desecador, al finalizar se pesa en la balanza analítica y se registra el valor obtenido (Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), 2010).

La humedad se expresa en porcentaje, para calcular su valor, se aplica la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco})}{\text{peso húmedo}} \times 100$$

Ecuación 6. Humedad

- pH

Para la determinación de pH en muestras sólidas como los sustratos objeto de estudio (Rastrojo de maíz y Retamo espinoso), se utiliza la técnica de “Determinación de pH en agua (H₂O)”, que consiste en pesar 10g de material vegetal o sustrato previamente seco a temperatura ambiente (20°C), transferir el material a un beaker de 100 mL, añadir 40 mL de agua destilada, homogeneizar con un agitador de vidrio y dejar reposar la mezcla durante 20 minutos, transcurrido el tiempo indicado se lee en el multiparámetro o pH-metro el valor del pH obtenido, del mismo modo se realiza la lectura con papel indicador (Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), 2010). En cuanto a la determinación de pH para el inóculo (Lodo digerido), se toman 40mL de muestra se lee en el multiparámetro o pH-metro el valor del pH obtenido, del mismo modo se realiza la lectura con papel indicador. Los procedimientos mencionados anteriormente, se realizan por triplicado para asegurar la validación de los datos obtenidos.

- Análisis de sólidos

Sólidos totales, fijos y volátiles.

Muestra acuosa o semisólida: Inóculo (Lodo Digerido)

Se mantiene la muestra de lodo digerido refrigerada a 4°C, de dos a cuatro días, se retira de la nevera de muestras del laboratorio de la Universidad El Bosque, con el fin de determinar los sólidos totales, fijos y volátiles de la muestra. Se emplea el método 2540G del Standard Methods para determinar el contenido de sólidos. En primer lugar, se prepara la cápsula para esto, se enciende un crisol o cápsula a 550°C por una hora en la mufla, en seguida, se calienta el crisol a 105°C durante una hora en la estufa, se refresca en desecador, posterior a esto se pesa y almacena en desecador hasta que esté listo para usar (Wilder, Costa, Kosmowski, & Purcell, 2011).

Se debe poner de 20 a 50mL de muestra en el crisol y pesar, secar a 105°C por veinticuatro (24) horas, enseguida dejar enfriar para balancear la temperatura en un desecador y pesar. Luego, transferir el residuo seco a una mufla, calentar hasta 550°C y encender por una hora, al finalizar se deja en el desecador hasta que este enfrié y se pesa. El procedimiento se realiza

por triplicado para reducir la incertidumbre de los valores obtenidos (Wilder, Costa, Kosmowski, & Purcell, 2011).

A continuación, se muestran las ecuaciones necesarias para el cálculo de los sólidos totales, volátiles y fijos en muestras acuosas o semisólidos:

$$g \text{ solidos totales} / L = \frac{(A - B) \times 1.000}{\text{Volumen de muestra (mL)}}$$

Ecuación 7. Sólidos totales

Donde:

A: masa del residuo seco + capsula después de secado en la estufa a 105°C, g

B: masa de la capsula, g

$$g \text{ solidos fijos} / L = \frac{(B - C) \times 1.000}{\text{Volumen de muestra (mL)}}$$

Ecuación 8. Sólidos fijos

$$g \text{ solidos volátiles} / L = \frac{(A - B) \times 1.000}{\text{Volumen de muestra (mL)}}$$

Ecuación 9. Sólidos volátiles

Donde:

A: masa del residuo + capsula después de secado en la estufa a 105°C, g

B: masa del residuo + capsula después de ignición en la mufla a 550°C, g

C: masa de la cápsula, g.

Muestras sólidas: Sustratos (Rastrojo de maíz- Retamo Espinoso)

Se debe pulverizar a mano con guantes el sustrato, ubicar de 20g a 50 g en un crisol preparado y pesar. Colocar en la estufa a 105°C durante la noche. Enfriar en un desecador y pesar, repetir secado, enfriar y pesar. Al finalizar, se introducen las muestras en la mufla durante una hora a 550°C, terminado el tiempo se deja enfriar en el desecador y se pesa. El procedimiento se realiza por triplicado para reducir la incertidumbre de los valores obtenidos (Wilder, Costa, Kosmowski, & Purcell, 2011).

A continuación, se muestran las ecuaciones necesarias para el cálculo de los sólidos totales, fijos y volátiles en muestras sólidas:

$$g \text{ solidos totales} / g = \frac{(A - B)}{\text{masa de muestra (g)}}$$

Ecuación 10. *Sólidos totales para muestras sólidas.*

Donde:

A: masa del residuo seco + capsula después de secado en la estufa a 105°C, g

B: masa de la capsula, g

$$g \text{ solidos fijos} / g = \frac{(B - C)}{\text{masa de muestra (g)}}$$

Ecuación 11. *Sólidos fijos para muestras sólidas.*

$$g \text{ solidos volátiles} / g = \frac{(A - B)}{\text{masa de muestra (g)}}$$

Ecuación 12. *Sólidos volátiles para muestras sólidas.*

Donde:

A: masa del residuo + capsula después de secado en la estufa a 105°C, g

B: masa del residuo + capsula después de ignición en la mufla a 550°C, g

C: masa de la cápsula, g.

Definición de la razón de carga

Para la definición de la razón de carga se tuvo en cuenta el proceso realizado por Vieira (2019), teniendo en cuenta el volumen útil del biorreactor y los valores del análisis de solidos obtenidos de la caracterización de los sustratos e inóculo, se estiman los valores de ST y SV de la carga de entrada del biorreactor de la siguiente manera:

$$ST \text{ carga de lodo } \left(\frac{g \text{ ST}}{L} \right) = \frac{ST \text{ lodo } \left(\frac{g \text{ ST}}{L} \right) * V \text{ útil del biorreactor (mL)}}{1000 \text{ (mL)}}$$

Ecuación 13. *ST carga de entrada del lodo al biorreactor.*

$$SV \text{ carga de lodo } \left(\frac{g \text{ SV}}{L} \right) = \frac{SV \text{ lodo } \left(\frac{g \text{ SV}}{L} \right) * V \text{ útil del biorreactor (mL)}}{1000 \text{ (mL)}}$$

Ecuación 14. *SV carga del lodo al biorreactor.*

Se sabe que la relación sustrato/inóculo debe ser menor o igual a 0,5 es decir 1:2 (Vieira, 2019), de esta manera, teniendo en cuenta el valor obtenido de los sólidos volátiles de la carga del lodo y la relación anteriormente mencionada se despeja el valor de sólidos volátiles de entrada del sustrato, como se muestra a continuación:

$$SV \text{ carga sustrato} = SV \text{ carga de lodo} * 0,5$$

Ecuación 15. *SV carga del sustrato al biorreactor.*

Finalmente, el valor obtenido en la Ecuación 13, se divide con los gramos de sólidos volátiles obtenidos en la caracterización de cada sustrato.

$$g \text{ sustrato} = \frac{SV \text{ carga sustrato}}{SV \text{ caracterización sustrato}}$$

Ecuación 16. Razón de carga.

5.5.2 Objetivo 2.

Monitoreo de las variables influyentes en la digestión anaerobia

Con la ayuda del biorreactor Batch, y los sensores de este (MQ2, MQ4, Sonda de pH, sensor de temperatura) se realiza el seguimiento diario de la producción de metano, biogás, pH y control de la temperatura. Los datos obtenidos se registran y graban en la micro-SD de capacidad instalada de 32GB, datos que se transfieren al ordenador y se ubican de manera organizada en un archivo Excel para su posterior ilustración en gráficas que sinteticen los datos máximos, mínimos y promedio de biogás y metano para cada uno de los ensayos, del mismo modo, se realizan gráficas que comparen los ensayos en simultaneo en variables de pH, producción máxima de biogás y metano.

Del mismo modo, se hace uso de las técnicas mencionadas en el apartado del objetivo 1, para el cumplimiento del presente objetivo, con el fin de evaluar las propiedades fisicoquímicas de la entrada y la salida de la carga orgánica en biorreactor, para su evaluación posterior, a partir de la cual se seleccionará el conjunto de sustrato e inóculo de mayor producción de metano, de acuerdo con el porcentaje de metano presente en el contenido de biogás y porcentajes de remoción de AGV y sólidos volátiles.

Análisis de las variables de monitoreo y los ensayos realizados

A partir de las gráficas realizadas, se procederá a justificar el comportamiento de los sustratos e inóculo durante los diferentes ensayos, del mismo modo se analizará la producción de biogás y metano y su posible utilización como fuente de aprovechamiento energético.

Tabla 16. Matriz metodológica.

Objetivo General: Evaluar la producción de metano en la digestión anaerobia de la especie invasora retamo espinoso (Ulex Europaeus) y residuo agrícola rastrojo de maíz, mediante el uso del biorreactor Batch a escala piloto como alternativa de aprovechamiento energético de biomasa en el sector rural de Colombia.					
Objetivo Específico	Actividad	Variable	Técnica	Instrumento	Entregable
Caracterizar las propiedades físicas y químicas del rastrojo de	Salida Técnica	-	Observación, registro de información	Libreta de campo, fotografías	Registro fotográfico
	Toma de muestras	-	Recolección de muestras	Equipo de recolección de muestras	Retamo espinoso, rastrojo de

maíz, retamo espinoso y lodo digerido para iniciar el proceso de digestión anaerobia en el Biorreactor Batch.	Caracterización de los sustratos: Rastrojo de Maíz, Retamo Espinoso.	Humedad	70 °C / Gravimétrico / NTC 5167	Práctica de laboratorio	maíz, lodo digerido Resultados de laboratorio
	Caracterización del inocular: Lodo digerido Planta de Tratamiento El Salitre	Carbono orgánico oxidable total (COOx)	Solución Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167	Servicio de laboratorio	Resultados de laboratorio
		Nitrógeno Orgánico/ Nitrógeno Total	Micro-Kjeldahl / Volumétrico / NTC 370	Servicio de laboratorio	Resultados de laboratorio
		pH	4500-H/ Standard Methods	Práctica de laboratorio	Resultados de laboratorio
	Caracterización del inocular: Lodo digerido Planta de Tratamiento El Salitre	Sólidos Totales (ST)	2540 G./ Standard Methods/	Práctica de laboratorio	Resultados de laboratorio
		Sólidos fijos (SF)	Sólidos Totales, Fijos y Volátiles en	Práctica de laboratorio	Resultados de laboratorio
		Sólidos volátiles (SV)	muestras sólidas y semisólidas.	Práctica de laboratorio	Resultados de laboratorio
		Ácidos Grasos Volátiles	5560 C. /Standard Methods/	Práctica de laboratorio	Resultados de laboratorio
		Alcalinidad	Método de Destilación	Práctica de laboratorio	Resultados de laboratorio
	Comparar la producción de metano de la digestión anaerobia del retamo espinoso y del rastrojo de maíz en el	Monitoreo de las variables influyentes en la digestión anaerobia	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	5220/ Standard Methods/	Práctica de laboratorio
Biogás Metano pH Temperatura			Medición a partir de sensores para Arduino	MQ2, MQ4, Sonda de pH para Arduino, Réle estado sólido, Biorreactor Batch	Datos organizados en tablas de síntesis de variables por ensayo realizado. Gráficas de datos obtenidos

biorreactor Batch para seleccionar la combinación de mayor porcentaje de metano				durante los tres ensayos	
		Sólidos Totales (ST) Sólidos volátiles (SV) Ácidos Grasos Volátiles Alcalinidad Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Análisis de laboratorio	Práctica de laboratorio	Síntesis de datos obtenidos al inicio y al final de cada ensayo registrados en una tabla organizada porcentajes de remoción de AGV y SV.
	Análisis de las variables de monitoreo y los ensayos realizados	AGV, DQO, Biogás, Metano, pH, ST, SV, SF.	Análisis de gráficas y resultados	Gráficas y registro de datos	Verificación de las hipótesis, selección ensayo de mayor producción de metano.

Fuente: Autores (2019)

6 Resultados, análisis y discusión

6.1 Objetivo 1.

6.1.1 Ajuste del biorreactor

El biorreactor fue entregado por el Programa de Bioingeniería en el mes de junio de 2019, este se caracteriza por estar construido de acero inoxidable quirúrgico 316, con los estándares de sanidad para el estado de asepsia de este. El volumen total es de 6 L y el volumen útil de 4,2 L. La entrega abarcó los siguientes elementos: un tubo de PVC 1L, un tubo de PVC 2 L, un manómetro, un tanque externo de calentamiento, una resistencia calentadora, una válvula anti retorno, las aspas de agitación, un sensor de metano MQ-4, una sonda de pH, un sensor de temperatura, tuercas (4) correspondientes a los agujeros presentes en el reactor para sellar las entradas de sonda de pH y del sensor de temperatura, la banda de sellado de la tapa del reactor y una goma para el ajuste de la misma.

Así mismo el sistema electrónico estaba compuesto de un Arduino mega, en el cual se encontraban todos los circuitos conectados constituyendo el sistema de control del biorreactor. Dentro de los circuitos que comprende el sistema de control se encontraban: el circuito para el control de temperatura (ON/OFF de la resistencia calentadora), un driver para el sensor de temperatura (termocupla), el driver para el motor que controla el movimiento de las aspas para la agitación y el driver del sensor de pH, estos elementos van conectados

directamente al Arduino que a su vez va conectado al sensor de metano, al módulo WiFi, pulsadores, potenciómetro y LCD para el monitoreo de dichas variables (Pérez, 2012).



Figura 11. *Biorreactor Batch.* Autores (2019)



Figura 12. *Sistema de control.* Autores (2019)

Por otro lado, no fue posible utilizar el módulo WiFi (ESP8266) para el almacenamiento y visualización de los datos en un servidor web, debido a que se requería una red WiFi estable y con esto la adquisición de la MAC de la red de la universidad. Por esta razón se decidió implementar un módulo para micro-SD y almacenar los datos generados en una memoria SD. Adicionalmente, se cambió el sensor de metano MQ-4, ya que el sensor inicial se encontraba deteriorado y se adicionó un nuevo sensor, el MQ-2, el cual permitió conocer la concentración de biogás, puesto que este sensor se caracteriza por detectar presencia de H₂, CO, aire (N₂ y O₂), componentes típicos identificados en el biogás (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

Ahora bien, dentro de los parámetros anteriormente mencionados, al realizar las pruebas de funcionamiento algunos de estos registraron falencias afectando el correcto funcionamiento del biorreactor. Como primera medida, el circuito para el control de la temperatura se encontraba quemado por tanto no se presentaba un control y estabilización de temperatura requerida. Por esto, se procedió a cambiar el circuito por un Relé Estado Sólido 24-380VAC 25A SSR-25DA, el cual permitió proporcionarle al sistema mayor seguridad energética al enviar una señal de control la cual permite que actúe el transistor interno generando el paso de corriente por los terminales de potencia, para que así se presentara un mejor control de la temperatura. También se realizó el cambio de la sonda de pH, ya que la original había perdido su funcionamiento al encontrarse seca la membrana de electrodo durante el periodo que estuvo en desuso el biorreactor.

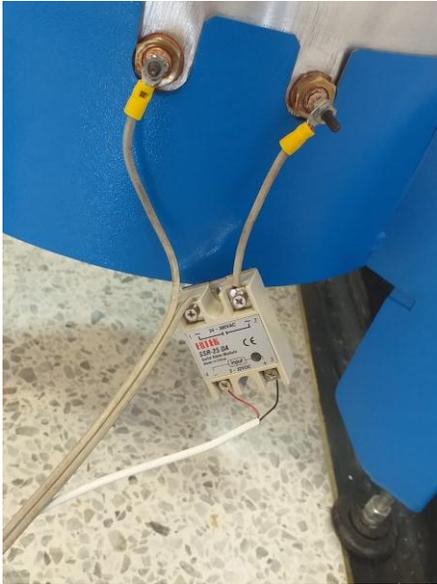


Figura 13. Relé estado sólido. Autores (2019)



Figura 14. Sonda de pH. Autores (2019)

Por otro lado, a pesar de la utilidad innegable de la memoria micro-SD, instrumento que facilitó el almacenamiento de datos durante el experimento, resultó difícil identificar algún fallo en el sistema, o cambios súbitos de los parámetros del monitoreo, puesto que la única manera de revisar los datos registrados en la micro-SD era extrayendo la memoria del módulo Arduino para conseguir examinar su contenido, al finalizar de cada operación. Lo anterior, por las características de operación del biorreactor, el cual al ser un dispositivo de funcionamiento por lotes o Batch, no admite aberturas, recolección de muestras, ingreso de material orgánico adicional durante el proceso, dado que dichas acciones modificarían la normalidad de la digestión y la confiabilidad de los datos registrados.



Figura 15. Memoria Micro SD. Autores (2019)

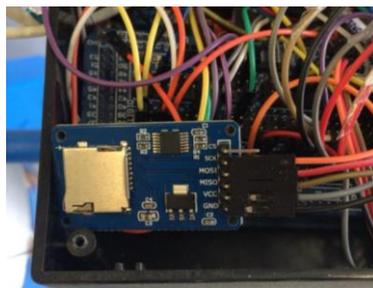


Figura 16. Modulo de Micro-SD para Arduino.



Figura 17. Sensores MQ-4 y MQ-2

Cabe resaltar, que se tomó la medida de adicionar el sensor MQ-2, debido a que uno de los tubos PVC del biorreactor en conjunto con la manguera de transporte de gas que conectaba

el sistema de desplazamiento por volumen de agua, presentaba fugas, del mismo modo, para la medición del volumen desplazado era necesario abrir la parte superior del tubo PVC de mayor tamaño para conferir el dato en la regla milimétrica incorporada en el sistema, procedimiento que permitía el escape de los gases que se deseaban medir, representando una pérdida en el volumen de biogás, por lo cual, lo más favorable para el proceso fue mantenerlo cerrado herméticamente con el fin de evitar modificaciones en los valores obtenidos.

Además, la implementación del Relé de estado sólido favoreció en gran medida los resultados obtenidos durante los ensayos realizados, manteniendo la temperatura de operación en un ambiente mesofílico, sin inconvenientes de cambios abruptos de temperatura que disminuyeran la producción de metano o el desempeño de las comunidades microbianas participantes en el proceso.

6.1.2 *Visitas técnicas para la recolección del sustrato e inóculo*

Finca de maíz Copa de los Ángeles

La colecta de rastrojo de maíz fue realizada en la finca Copa de los Ángeles ubicada en la vereda Alto del Molino en Pasca, Cundinamarca, en las coordenadas 4° 19' 31.99" N y 74° 17' 16.18" O. La finca presenta una siembra de cultivo de maíz de extensión de 1 Hectárea, y se realiza 2 veces al año con una duración de 4 meses y medio, se realiza un proceso de inyección con látigo (insecticida), master polución y nitrato de potasio. El sistema de riego del cultivo se realiza durante 2 horas una vez a la semana, lo cual representa un consumo de agua aproximado de 2.640 L de agua. Según el propietario de la finca identificado como José Raúl Bermúdez, aproximadamente se producen 6082,04 Kg de maíz por siembra, cuyos residuos de producción representan un valor cercano a 4000 Kg por siembra, es decir cada 4 meses y medio, este residuo agrícola es utilizado como abono de cultivos y alimento para el ganado, en la finca Copa de los Ángeles.



Figura 18. *Cultivo de maíz de la finca en Pasca, Cundinamarca.* Fuente: Autores (2019).

Cerros orientales (Monserate)

De acuerdo al permiso otorgado por la ANLA, los fragmentos de retamo espinoso fueron recolectados en los Cerros orientales del Bogotá, localidad de Santafé, en las coordenadas

4°36'27.4'' N – 74°03'50.2''W. La técnica de recolección utilizada fue la colecta manual, en donde se colectó un espécimen (Fig. 18) y se dividió en 16 fragmentos (Fig. 19). El material biológico se transportó en bolsas plásticas herméticas, debidamente selladas, todas ubicadas dentro de una bolsa negra con la etiqueta de embalaje correspondiente (Anexo 2).



Figura 19. *Especimen de retamo espinoso.*
Autores (2019)



Figura 20. *Fragmentos de retamo espinoso.*
Autores (2019)

El rastrojo de maíz y el retamo espinoso fueron molidos en los laboratorios de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional para la realización de las pruebas fisicoquímicas y el ingreso de los sustratos al biorreactor. Esta medida es necesaria teniendo en cuenta que, para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia es necesario que el sustrato que ingresa sea de un tamaño de partícula aproximado de 1 a 4 cm para que el proceso de digestión se desarrolle de manera adecuada, durante el tiempo de retención hidráulica seleccionado (Pérez, 2012).



Figura 21. *Molino Universidad Nacional de Colombia.* Autores (2019).



Figura 22. *Sustratos molidos.* Autores (2019)

PTAR EL Salitre

Para la recolección del lodo digerido se realizaron seis visitas a la planta, tres de ellas fueron para hacer la recolección de 5 litros de lodo digerido y las otras tres para hacer la respectiva devolución del lodo saliente de cada corrida en el biorreactor, asegurando la disposición final adecuada de este residuo al ser un residuo peligroso, clase 6.2, sustancia infecciosa. Dentro de esos 5 L se destinaron 4.2 para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia en el biorreactor y los 800 mL restantes para realizar las pruebas físicas y químicas mencionadas en la metodología.



Figura 23. *Lodo digerido.* Autores (2019)



Figura 24. *PTAR El Salitre.* Autores (2019)

Con el biorreactor listo para su funcionamiento, y los sustratos recolectados se realizaron los análisis fisicoquímicos mencionados en la metodología, para el inóculo y sustrato empleados con el fin de establecer las condiciones de entrada de estos al biorreactor y la razón de carga. Además, a partir de la revisión bibliográfica realizada en el estado del arte se estipularon los

parámetros de operación, (temperatura, agitación, tiempo de retención hidráulica). Al final de esta sección se profundizará esta parte.

6.1.3 Caracterización fisicoquímica del inóculo y sustrato

Lodo digerido

Como se mencionó en la metodología, antes de iniciar el proceso de caracterización, fue necesario preparar las soluciones a utilizar, de esta manera se realizó la estandarización de la solución de NaOH 0,1M y HCl 0,1M.



Figura 25. Estandarización de reactivos. Autores (2019)

A partir de la estandarización realizada se logra comprobar, que la preparación de las soluciones correspondía a molaridades de 0,1M, como se tenía previsto. De esta manera, se procede a ubicar las soluciones en envases debidamente sellados para su adecuado almacenamiento y posterior uso.

Para comenzar, los resultados obtenidos de la caracterización del lodo anaerobio digerido proveniente del PTAR Salitre, presentan algunas variaciones en relación con los valores reportados por Cendales (2011), lo cual se explica a través del cambio constante en el contenido del lodo anaerobio, el cual permanece en los digestores de la PTAR el salitre de 19 a 22 días, y sale del sistema, de manera regular, para su aprovechamiento. En lo que respecta a los sólidos totales, se obtuvo un valor de 24,135 gST/L, que difiere en 13,50 unidades del valor obtenido en el estudio realizado por cendales (2011), quien registra 37,64 gST/L, cuando la magnitud de esta variable es baja, la movilidad de las bacterias metanógenicas dentro del sustrato no presenta dificultades, y de esta manera aumenta la producción de metano (Varnero, 2011). Por otro lado, el valor de sólidos volátiles, que representa la materia seca que se convertirá en metano durante el proceso de digestión anaerobia, fue de 15,068 g SV/L, mientras que en el análisis de sólidos realizado por Cendales (2011), el valor de SV fue de 22,74 g SV/L.

Tabla 17. Caracterización del lodo digerido.

Parámetro	Unidad	Valor
Sólidos Totales (ST)	g ST/L	24,135
Sólidos Totales Fijos (STF)	g STF/L	9,067
Sólidos Volátiles (SV)	g SV/L	15,068
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	mg CH ₃ COOH/L	1.344
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	3.560
pH	Unidades de pH	7,63
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/ L O ₂	3.254

Fuente: Autores (2019)



Figura 26. Análisis de sólidos del lodo digerido. Autores (2019).

Por otra parte, los resultados obtenidos para el parámetro de AGV, en el lodo digerido utilizado como inóculo en el presente estudio fue de 1.344 mg CH₃COOH/L, valor que se caracteriza por ser neutralizado por acción de la alcalinidad presente en el lodo que además, estabiliza el pH, en los procesos de digestión que ocurren en los reactores anaeróbicos (Varnero, 2011), esto se puede evidenciar en el valor obtenido para la alcalinidad 3.560 mg CaCO₃/L, valor que logra reducir la acumulación de los AGV, y favorecer el pH inicial del inóculo, siendo este de 7,63 (tabla 17). Sin embargo, el valor obtenido de AGV, simboliza la cantidad de ácidos grasos u orgánicos que podrán ser transformados en metano durante el proceso, como suele ocurrir, en la monodigestión del lodo anaerobio, la producción de metano es menor a la esperada en el caso de contar con la presencia de un sustrato colaborador, es por esto que el inóculo sin adición de material orgánico se utiliza como ensayo de control del proceso de digestión anaerobia, para establecer las diferencias significativas entre la existencia o no de nutrientes digeribles por los microorganismos y su relación en la producción de metano.



Figura 27. Determinación de los AGV. Autores (2019).

Para terminar, la medida de DQO, obtenida para el lodo anaerobio digerido, fue de 3.254 mg O₂/ L, este valor determina indirectamente el contenido de materia orgánica y compuestos oxidables presentes en la muestra, en este caso, el valor obtenido indica la disminución de la población microbiana presente antes del proceso de digestión desarrollado en las instalaciones de la PTAR el Salitre, del mismo modo, indica la existencia de material susceptible a la biodegradación y con esto la capacidad de continuar la producción de metano.

Rastrojo de maíz

Dentro de la caracterización realizada para el rastrojo de maíz es importante resaltar el valor de sólidos totales (ST) puesto que como lo menciona Croce, Wei, D'Imporzano, Dong & Adani (2016), la producción de biogás depende del contenido total de estos, así como también de la composición de la materia orgánica que presenta el contenido de sólidos, es decir la celulosa, hemicelulosa y la lignina. Es pertinente mencionar que para el presente estudio no se realizaron estas pruebas, sin embargo, resulta un factor importante a la hora de evaluar la digestibilidad de este sustrato. Como se muestra en la Tabla 18, el contenido de sólidos totales es significativo convirtiéndolo en un sustrato potencial para el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 18. Caracterización del rastrojo de maíz.

Parámetro	Unidad	Valor
Sólidos Totales (ST)	g ST/g	0,913
Sólidos Totales Fijos (STF)	g STF/g	0,135
Sólidos Volátiles (SV)	g SV/g	0,778
Carbono Orgánico Oxidable Total (COOx)	%	34,7
Humedad	%	8,42
Nitrógeno Total (NT)	%	1,38

Nitrógeno Orgánico	%	1,38
pH		9,7

Fuente: Autores (2019)

Dicho lo anterior y teniendo en cuenta la Tabla 3, donde se muestran los valores reportados en la literatura y de acuerdo el valor obtenido, el contenido de ST es similar teniendo en cuenta que el reportado es de 0,94 g ST/g y el obtenido fue de 0.913 g ST/g generando una diferencia de tan solo 0,027 g ST/g. Otro valor obtenido que resulta pertinente a la hora de evaluar este proceso, es el contenido de sólidos volátiles (SV), de acuerdo con el manual de producción de biogás (Varnero, 2011) los SV contienen los componentes orgánicos mencionados anteriormente que una vez degradados son los que técnicamente son convertidos a metano por lo que el valor obtenido, 0,778 g SV/g, puede predecir una significativa producción de metano.



Figura 28. Análisis de sólidos del rastrojo de maíz. Autores (2019)

Ahora bien, la relación Carbono/Nitrógeno en la caracterización de los sustratos resulta determinante en la medida que este influye en la actividad bacteriana y por consiguiente en el proceso de digestión anaerobia, cuando el proceso se encuentra en desarrollo los microorganismos utilizan el carbono entre 25-30 veces más rápido que el nitrógeno, por lo cual un contenido inadecuado de nitrógeno puede ocasionar que el proceso se torne lento influyendo en la reacción de conversión de sustrato a biogás (Croce, Wei, D'Imporzano, Dong & Adani, 2016), para este caso, dentro de los resultados arrojados por el laboratorio AGRILAB LTDA, el porcentaje de COOx es de 34.7% y el de NT de 1.38%, es decir que la relación C/N tendría un valor de 25,14. Comparando el valor obtenido con la Tabla 3, la cual reporta una relación C/N de 71, la relación que se obtuvo es baja ya que este valor reportado en el estudio de Zhong et al (2011) está muy por encima del óptimo, puesto que según Frigon y Diot (2010) citados por Croce et al (2016), al presentarse una alta relación C/N puede conllevar a que se presente una acumulación de AGV y se disminuya el pH causando la inhibición del proceso. Mientras que el obtenido en la presente investigación se sitúa dentro de los valores óptimos teniendo en cuenta lo reportado por Deublein & Steinhauser (2010) citados por Croce et al (2016) los cuales indican que una relación C/N fácilmente degradable está en la relación óptima de 16:1 a 25:1.

Dentro de las razones que explican la diferencia que se presentó en el valor obtenido con respecto al reportado en el apartado anterior puede verse implicada la procedencia del sustrato teniendo en cuenta las condiciones geográficas del cultivo, el rastrojo de maíz que arrojó una alta relación C/N se recolectó del distrito de Changping, en la ciudad de Beijing, China. Mientras que el del presente estudio, como se mencionó en el apartado de marco geográfico y visita técnica se recolectó en Pasca, Cundinamarca.



Figura 29. *Determinación del pH de la paja de maíz.* Autores (2019)

En lo que respecta al pH y humedad, el valor de pH se encontró en un rango de 9,7 lo que indica un pH significativamente básico, mientras que el contenido de humedad fue mínimo siendo de 8,42 %. Esto se puede explicar debido al tiempo que se dejó secando la paja desde el día de su recolección hasta el inicio de las pruebas lo que ocasionó una disminución en sus contenido de humedad.

Retamo espinoso

El retamo espinoso pertenece a la familia de la Fabaceae o Leguminosae, este tipo de plantas superiores están compuestas por polifenoles vegetales, que son metabolitos secundarios, que se caracterizan por ser solubles en agua, compuesto por más e 12 grupos fenólicos y anillos aromáticos, esta composición favorece las reacciones bioquímicas en un ambiente anaerobio, para la producción de biogás y metano, en conjunto con el consorcio microbiano (Isaza, 2007; Aldana Páez, 2015). Es importante señalar, que los metabolitos secundarios no desempeñan una función directa en los procesos de fotosíntesis, respiración, asimilación de nutrientes, transporte de solutos o síntesis de proteínas (Ávalos García & Pérez-Urria , 2009).

A continuación, se muestra la síntesis de información obtenida acerca de la composición del retamo espinoso:

Tabla 19. Caracterización del retamo espinoso.

Parámetro	Unidad	Valor
Sólidos Totales (ST)	g ST/g	0,877
Sólidos Totales fijos (STF)	g STF/g	0,062
Sólidos Volátiles (SV)	g SV/g	0,815
Carbono orgánico oxidable total (COOx)	%	37,6
Humedad	%	9,95
Nitrógeno Total (NT)	%	0,991
Nitrógeno Orgánico (NO)	%	0,991
pH		7,3

Por otro lado, los sólidos totales (ST) obtenidos fueron de 0,877 g ST/g, este valor es similar al obtenido por Costa, Oliveira, & Alves (2016), el cual fue de 0,68 gST/g, de esta manera, se puede afirmar que las características de este sustrato no difieren drásticamente, en cuanto a los sólidos volátiles se alcanza un valor de 0,815 g SV/g, este último indica que el 81,5% de la materia orgánica que entra como sustrato es biodegradable, siendo así, se espera que la producción de metano a partir de la descomposición del retamo espinoso sea significativa (tabla 19).



Figura 30. Análisis de sólidos del retamo espinoso. Autores (2019)

En lo que se refiere a la relación C/N, a partir de los resultados entregados por el laboratorio AGRILAB LTDA, correspondientes al porcentaje de COOx (37,6%) y NT (0,991%), se procede a calcular la relación C/N, obteniendo así un valor de 37,94, valor que supera el rango que asegura el proceso estable de digestión anaerobia, según lo reportado por Deublein & Steinhauser (2010) citados por Croce et al (2016) los cuales indican que una relación C/N de fácil consumo para los microorganismos está en la relación óptima de 16:1 a 25:1. Sin embargo, la relación C/N obtenida para el retamo espinoso, no se encuentra significativamente distante, del valor reportado por Wahid & Islam Siddique (2018), de una relación ideal de carbono nitrógeno ubicada en un rango de 20 a 30, en donde el valor de carbono, esta presente en mayor proporción que el nitrógeno, evitando así la generación

excesiva de ácidos grasos volátiles y con esto las condiciones desfavorables para los microorganismos en el proceso de digestión y producción de metano.



Figura 31. *Determinación del pH del retamo espinoso.* Autores (2019)

En adición, el valor de contenido de humedad del retamo espinoso fue de 9,95%, un valor considerablemente bajo, sin embargo indica que el tiempo de secado no fue suficiente para la remoción total de la humedad allí presente, por otro lado el porcentaje obtenido difiere en 22,5%, del reportado por Costa, Oliveira & Alves (2016), quienes registraron 32% de humedad en la muestra de retamo espinoso analizada, sumado a esto, el valor de nitrógeno total presente en la especie *Ulex Europaeus* fue de 0,991 que difiere en 0,639 unidades del valor reportado por Costa, Oliveira, & Alves (2016) , de nuevo, a pesar de ser especies estudiadas en diferentes lugares (Colombia-Portugal) presentan características similares, cabe aclarar que esta especie es de origen Europeo como se menciona en el marco teórico.

Para finalizar, es importante destacar el la presencia de lignina, Celulosa y hemicelulosa, componentes que catalogan al retamo espinoso como material lignocelulósico, tal como se describe en secciones anteriores, por un lado, el porcentaje de lignina según Costa, Oliveira, & Alves (2016) es de 17%, valor que se aleja 7,5% del calculado por Aldana (2015) siendo este de 24,5%, aun así, no presentan un rango amplio de variación, la lignina se ubica en la pared celular de la planta, da soporte y rigidez a los tallos y tejidos vasculares permitiendo el crecimiento vertical y el transporte de agua (Ávalos García & Pérez-Urria , 2009).Por otro lado, Aldana Páez (2015), asegura que el contenido de Celulosa y hemicelulosa de *Ulex Europaeus* es de 47,5% y 22,2% respectivamente, estas son sustancias capaces de ser degradadas por los microorganismos.

6.1.4 *Definición de la razón de carga*

De acuerdo con lo estipulado en la metodología las razones de carga del biorreactor obtenidas fueron las siguientes:

Para el rastreo de maíz se obtuvo un valor de 42,78 g el cual representó la cantidad de material que ingresó al biorreactor, cumpliendo así la relación S/I mencionada por Vieira

Serufo (2019). Del mismo modo teniendo en cuenta el volumen útil del biorreactor la cantidad de lodo que ingresó fue de 4,2 L.

Carga sustrato 1 (Rastrojo de maíz)

Tabla 20. Razón de carga del rastrojo de maíz.

Componente	Carga de entrada	Cantidad de muestra	ST	SV	Relación S/I
Sustrato	Rastrojo de maíz	42,78 (g)	39,06	33,27	0,5
Inóculo	Lodo digerido	4.200 (mL)	101,67	66,59	0,5

Fuente: Autores (2019)

Así mismo, para el retamo espinoso se obtuvo un valor de 40,78 g el cual representó la cantidad de material que ingresó al biorreactor, cumpliendo la relación S/I mencionada por Vieira Serufo (2019). Y como se mencionó anteriormente, teniendo en cuenta el volumen útil del biorreactor la cantidad de lodo que ingresó fue de 4,2 L.

Carga sustrato 2 (Retamo espinoso)

Tabla 21. Razón de carga del retamo espinoso.

Componente	Carga de entrada	Cantidad de sustrato	ST	SV	Relación S/I
Sustrato	Retamo Espinoso	40,78 (g)	35,76	33,22	0,5
Inóculo	Lodo digerido	4.200 (mL)	112,76	66,48	0,5

Fuente: Autores (2019)

Ahora bien, una vez definida la razón de carga para el biorreactor, se determinaron los parámetros de operación de este, tomando como referencia lo reportado por los autores citados en el estado del arte y marco teórico. Teniendo en cuenta lo anterior, para la definición de la temperatura de operación, se elige el proceso mesofílico caracterizado por presentar un rango de temperatura de 25°C - 40°C, este rango es considerado óptimo para el desarrollo de un proceso estable de digestión anaerobia, al presentar temperaturas de mayor adaptación para los microorganismos metanogénicos (Wahid & Islam Siddique, 2018). De acuerdo con Acosta & Obaya (2005), el valor de temperatura ideal de funcionamiento es de 35°C por tal motivo para el desarrollo experimental del proceso fue seleccionada dicha temperatura.

Como lo menciona Olaya (2006), citado por Olaya & González (2009), el rango de TRH para ambientes mesofílicos es de 10-40 días, a partir de esta información se eligió un TRH de 19 días, que además de cumplir con el rango correspondiente a la temperatura establecida se ajustó con el tiempo disponible para el desarrollo experimental del proyecto, dado que se realizaron tres ensayos con sus respectivos monitoreos. Por otro lado, otro de los aspectos esenciales para el funcionamiento de la digestión anaerobia fue la agitación, en ese caso se seleccionó un intervalo de agitación de 8 horas con una duración de 10 minutos, condiciones estipuladas por Martínez, Numpaque & Alvarado (2016). Cabe resaltar que, el nivel de producción de biogás depende del contacto entre los microorganismos y los sustratos, lo cual se obtiene mediante la agitación en el biorreactor. Sin embargo, este contacto no debe representar un riesgo para la comunidad de bacterias acetogénicas y Archeas metanogénicas puesto que estas se encargan de la producción del biogás (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

Por último, se presenta la síntesis de las variables de operación definidas para el inicio del proceso de digestión anaerobia para cada uno de los ensayos en el biorreactor:

Tabla 22. *Parámetros establecidos para el inicio del proceso de digestión anaerobia.*

Variable de operación	Valor
Temperatura	35°C
Intervalo de agitación	Ocho (8) horas
Frecuencia/ intensidad de agitación	Diez (10) minutos
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	Diecinueve (19) días

Autores (2019)

6.2 Objetivo 2.

6.2.1 Producción de metano y biogás

6.2.1.1 Inóculo

Teniendo en cuenta los parámetros definidos al finalizar el objetivo 1, se inicia el proceso de digestión anaerobia, con la muestra blanco, es decir, el inóculo, representado por el lodo digerido proveniente de la PTAR El Salitre, durante los 19 días definidos para el desarrollo del proceso, se realizó el monitoreo de las variables temperatura, pH, biogás y metano, como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23. Producción de biogás y metano en la digestión anaerobia del lodo digerido (Inóculo).

Día	T (°C)	pH	Biogás (mg/L)			Metano (mg/L)		
			Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
1	38,8	6,29	871,58	2.266,74	1.288,86	72,01	898,36	509,44
2	35,1	6,27	973,42	1.507,47	1.162,54	390,38	805,12	564,97
3	35,2	5,92	1.136,84	1.185,95	1.154,20	729,85	799,44	760,83
4	35,2	6,13	1.136,84	1.157,32	1.147,73	774,92	1.006,44	851,02
5	35,2	6,12	1.116,38	1.157,32	1.134,98	799,44	1.120,17	886,71
6	35,1	6,3	1.132,71	1.221,82	1.138,73	757,99	1.157,32	843,07
7	35,1	6,6	1.095,93	1.449,47	1.148,32	720,5	1.120,15	781,96
8	35,1	6,9	1.108,15	1.128,61	1.117,22	679,45	1.065,03	729,60
9	35,1	7	1.116,38	1.841,48	1.443,08	263,18	890,71	736,55
10	31,9	7,3	1.243,41	2.162,39	1.418,11	185,03	923,29	264,08
11	35,0	7,86	1.165,46	1.255,74	1.191,52	167,32	195,65	177,14
12	34,9	6,87	1.157,32	1.202,37	1.179,63	167,32	177,93	173,67
13	35,0	7,04	1.136,84	1.173,67	1.153,77	169,08	185,03	176,90
14	35,0	7,13	1.075,48	1.428,79	1.143,56	149,64	284,58	187,40
15	34,9	7,23	1.075,48	1.116,38	1.094,37	181,47	193,89	187,81
16	34,7	6,92	1.067,26	1.099,98	1.085,95	185,03	202,75	193,76
17	34,8	7,2	1.063,17	1.112,25	1.087,18	193,89	208,06	201,62
18	34,7	7,23	1.001,92	1.362,77	1.064,30	167,32	307,81	203,32
19	34,7	7,3	534,17	1.181,87	1.048,89	6,93	336,47	208,81

Fuente: Autores (2019)

A partir de la tabla anterior, se puede afirmar que no se presentó un cambio significativo en la temperatura del proceso puesto que estuvo en el ambiente mesofílico seleccionado, sin embargo, en los días 1 y 10 se presentaron variaciones de +/-4°C, las cuales se explican a continuación: en el día 1 ocurre el fenómeno de adaptación del lodo digerido al ingresar al biorreactor ajustándose a sus condiciones de operación. En cuanto al día 10, puede atribuirse a la disminución del agua presente en la base del biorreactor, que es la encargada de mantener la temperatura de la resistencia en conjunto con el control del Relé de estado sólido incorporado.

Al iniciar el proceso de digestión anaerobia el pH del inóculo fue de 6,29, valor que indica la presencia de bacterias acidogénicas, por lo que se infiere que el lodo se encontraba en fase de acidogénesis, cuyo rango comprende valores de pH que van desde 5,5 – 6,5 (Bajpai, 2017). Teniendo en cuenta los resultados de pH obtenidos en los días posteriores, se puede afirmar que la fase acidogénesis se presentó del día 1 al 7. En esta fase, las bacterias acidogénicas convierten las moléculas simples en ácidos orgánicos y AGV (Figura 1). Ahora bien, desde el día 8, el valor de pH empezó a aumentar, arrojando valores que se encontraban en el rango perteneciente a la fase de metanogénesis o producción de metano (6,7 – 7,4) según lo reporta

Cendales (2011). Sin embargo, el día 11 se manifiesta un incremento de pH que alcanza el valor de 7,86, valor en el cual actividad metanogénica se reduce drásticamente inhibiendo la producción de metano (Bajpai, 2017), esto se puede ver reflejado en el resultado de biogás y metano obtenido para ese día (Figura 31-32).

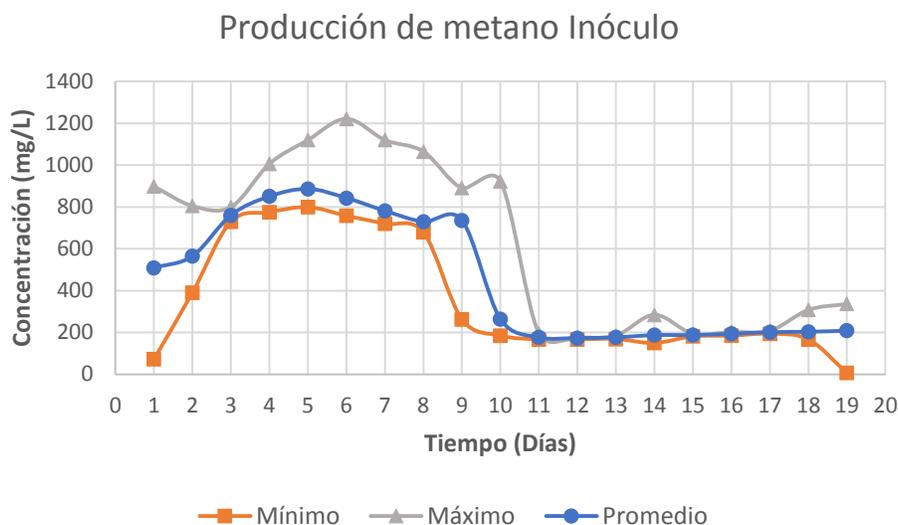


Figura 32. Producción de metano en la digestión anaerobia del inóculo. Autores (2019).

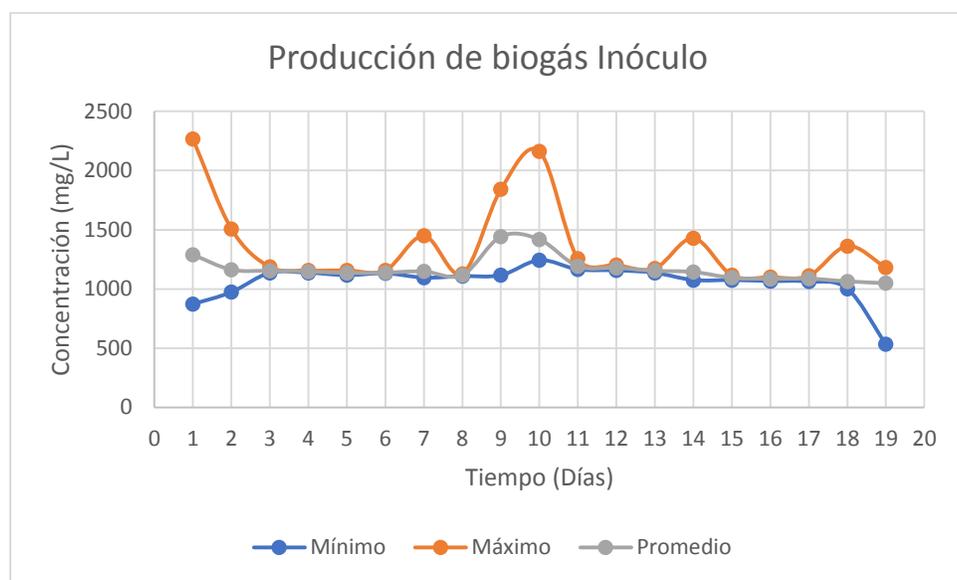


Figura 33. Producción de biogás en la digestión anaerobia del inóculo. Autores (2019)

La producción máxima de metano en la digestión anaerobia del inóculo se presentó el día 5. Con una concentración de biogás de 1.157,32 mg/L, cuyo contenido de metano fue de 1.120,17 mg/L representando un porcentaje de producción de metano del 96,79% (Tabla 22) en el biogás. Por otro parte, la concentración mínima de biogás y de metano se presentó el último día de la fase experimental del inóculo (día 19) con concentraciones de: 534,17 mg/L

y 6,93 mg/L respectivamente y un porcentaje de producción mínima de metano de 1,30%. Esta disminución de producción se puede atribuir a la fase exponencial de muerte la cual representa la significativa reducción de la población microbiana, a razón de la ausencia de nutrientes necesarios para su desarrollo (Cendales, 2011). En promedio la concentración de metano durante los 19 días fue de aproximadamente 708,43 mg/L.

Tabla 24. *Porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del inóculo*

Día	Metano (%)		
	Mínimo	Máximo	Promedio
1	8,26	39,63	39,53
2	40,10	53,41	48,60
3	64,20	67,41	65,92
4	68,16	86,96	74,15
5	71,61	96,79	78,13
6	66,92	94,72	74,04
7	65,74	77,28	68,10
8	61,31	94,37	65,30
9	23,57	48,37	51,04
10	14,88	42,70	18,62
11	14,36	15,58	14,87
12	14,46	14,80	14,72
13	14,87	15,77	15,33
14	13,91	19,92	16,39
15	16,87	17,37	17,16
16	17,34	18,43	17,84
17	18,24	18,71	18,55
18	16,70	22,59	19,10
19	1,30	28,47	19,91

Fuente: Autores (2019)

En relación con los resultados obtenidos del monitoreo inicial y final del proceso de digestión anaerobia del inóculo (Tabla 27), se puede inferir lo siguiente: los AGV presentaron una disminución al final del proceso con un porcentaje de remoción del 50,89%, puesto que al inicio del proceso el valor fue de 1.344 mg de CH₃COOH/L y al finalizar fue de 660 mg de CH₃COOH/L. Estos valores coinciden con la disminución de la generación de metano y biogás mencionados anteriormente, además, concuerdan con los resultados obtenidos en la investigación de Cendales (2011). Los AGV son transformados en H₂ y CO₂ por las bacterias acetogénicas, productos que son posteriormente utilizados por las bacterias metanogénicas para la producción de metano. De esta manera, se infiere que los AGV removidos fueron convertidos en metano progresivamente como se muestra en la Tabla 23.

Acerca de la alcalinidad, se obtuvo un resultado inicial de 3.560 mg CaCO₃/L y final de 1.550 mg CaCO₃ es decir una remoción de 56,46% durante el proceso, lo anterior porque se reduce la cantidad disponible de nitrógeno que asegura el crecimiento adecuado de la comunidad

microbiana y con esto la producción de metano como lo menciona Bogotá, Díaz & Ramos (2008), citados por (Pérez, 2012). Así mismo, la alcalinidad tiene la capacidad de neutralizar los AGV, proporcionando un grado de estabilidad al pH durante el proceso (Varnero, 2011), cómo se muestra en la Figura 39.

Con respecto a la DQO, el valor inicial para el inóculo es de 3.254 mg O₂ /L, y al finalizar el ensayo, esta aumenta alcanzando una magnitud de 13.290 mg O₂ /L, este incremento de 75,51%, puede explicarse a través de varias circunstancias, una de ellas, es la posible presencia de microorganismos capaces de soportar temperaturas mesofílicas y sobrevivir sin necesidad de nutrientes, de esta manera al dar por terminado el proceso de digestión anaerobia, el día 19, se presentó el incremento mencionado, como segunda alternativa, se presume, que en el momento de tomar la muestra y llevarla al contenedor de almacenamiento, se pudo haber contaminado con algunas sustancias allí presentes, puesto que este había sido utilizado para el transporte de la muestra inicial de lodo, en ese caso, de haber permanecido en las inmediaciones del recipiente algún residuo del material, este pudo sumar en magnitud al resultado de la DQO esperada. Por último, una tercera causa, estaría relacionada con el sistema de agitación, en caso de ser este deficiente es capaz de incidir en la acumulación de sólidos en la parte inferior del biorreactor y de esta manera incrementa la demanda de oxígeno para la degradación de la materia orgánica presente en el inóculo.

Finalmente, los análisis de sólidos volátiles presentaron una disminución en su contenido pasando de 15,068 g SV/L a 13,736 g SV/L, lo que representa un porcentaje de remoción del 8,78%, este valor técnicamente representa el porcentaje de materia orgánica que es transformada en metano (Varnero, 2011). A su vez, los sólidos totales presentaron un aumento de 33,136 g ST/L, dado que su valor inicial fue de 24,135 g ST/L y al finalizar el proceso de digestión fue de 57,271 g ST/L, el aumento en los sólidos totales puede ocasionar la disminución de la actividad microbiana y por consiguiente el proceso de producción de metano (Varnero, 2011).

6.2.1.2 Rastrojo de maíz

Una vez finalizado el primer ensayo (inóculo), se inició el proceso de digestión anaerobia con el rastrojo de maíz (sustrato) y lodo digerido (inóculo) durante los 19 días definidos para su desarrollo, como en el caso anterior se realizó el monitoreo de las variables temperatura, pH, biogás y metano, como se muestra en la tabla 23.

Tabla 25. Producción de biogás y metano en la digestión anaerobia del rastrojo de maíz (sustrato) y lodo digerido (inóculo),

Día	T (°C)	pH	Biogás (mg/L)			Metano (mg/L)		
			Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
1	34,5	7,65	2.095,93	3.027,42	2.283,74	192,95	540,87	371,11
2	35,1	7,75	2.342,16	2.778,48	2.452,02	472,72	627,62	518,52
3	35,1	7,56	2.321,57	2.598,80	2.431,29	528,30	932,30	684,52
4	35,2	7,35	2.424,69	2.611,33	2.488,03	573,32	645,78	611,48
5	34,7	7,14	2.424,69	2.644,62	2.489,04	600,43	673,10	626,83
6	35	6,83	2.362,77	2.611,33	2.413,86	600,43	727,97	620,23
7	35	6,71	2.383,40	2.673,86	2.442,47	727,97	1.153,86	961,24
8	35,1	6,66	2.342,16	2.632,15	2.396,24	934,18	1.122,89	969,42
9	35	7,3	2.321,57	2.619,61	2.411,46	783,20	1.047,96	941,31
10	35	7,23	2.445,36	2.778,48	2.501,15	829,50	998,45	850,49
11	34,9	7,16	2.383,40	2.673,86	2.453,35	711,47	885,41	782,86
12	35	7,14	2.370,97	2.715,65	2.469,00	654,88	812,79	701,46
13	32,7	7,28	2.404,04	2.820,46	2.447,59	638,50	816,49	706,37
14	35	6,71	2.342,16	2.740,73	2.407,50	645,78	829,50	671,70
15	35	7,4	2.342,16	2.841,48	2.470,80	647,59	829,50	684,04
16	35	7,24	2.387,49	2.841,48	2.470,10	665,80	848,09	696,11
17	34,9	7,17	2.362,77	2.896,21	2.485,40	653,05	885,41	703,29
18	35,1	7,1	2.461,88	2.803,63	2.507,69	663,98	829,50	709,62
19	34,5	7,47	2.175,59	3.117,67	2.478,81	192,95	1.318,53	649,65

Fuente: Autores (2019)

Según la tabla anterior, se observa que, durante el proceso, la temperatura se mantuvo constante exceptuando el día 13, donde presentó una disminución de 2,3°C, si bien, esta reducción no representa un cambio significativo, este hecho se puede atribuir a la disminución del agua presente en la base del reactor, que hace parte fundamental del control de la temperatura, como se mencionó en el primer ensayo (inóculo). Para este ensayo una vez más se ratifica que el proceso estuvo en un ambiente mesofílico.

El pH inicial en la digestión anaerobia del rastrojo de maíz fue de 7,65 valor que, no se encuentra en el rango perteneciente a la fase de metanogénesis, sin embargo, hace parte de los valores que favorecen el proceso de digestión anaerobia. Cabe resaltar que, los valores de pH que inhiben el proceso de producción de metano se localizan en la franja menor a 6,3 y/o mayor a 7,8. Durante los primeros 3 días ocurre el fenómeno de adaptación del sustrato y el inóculo en el biorreactor, esto por la estabilización que se logra distinguir a partir de los datos

de pH obtenidos (Tabla 23). A partir del día cuarto se normaliza el pH en un intervalo de (6,7-7,4) entrando al rango correspondiente a la fase metanogénica.

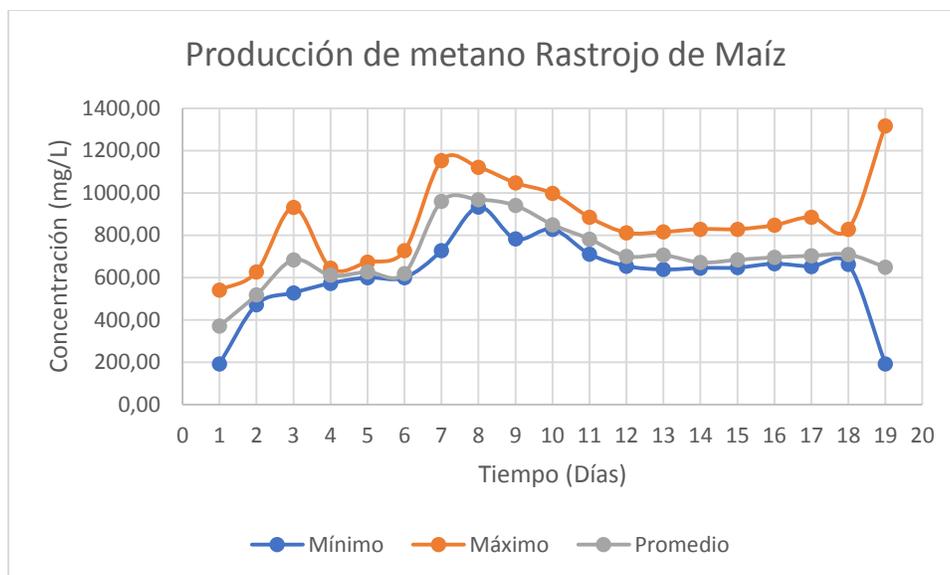


Figura 34. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia del Rastrojo de Maíz, Autores (2019).

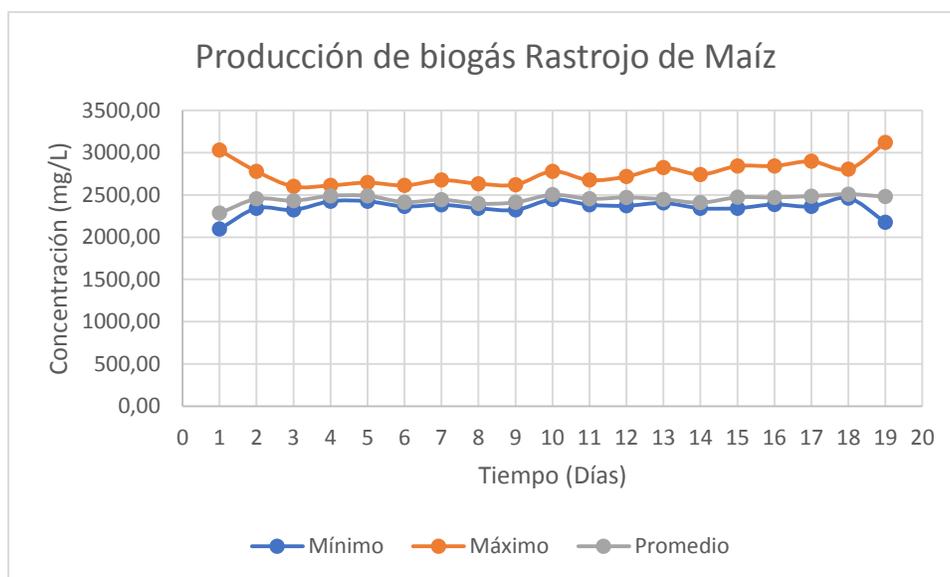


Figura 35. Producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del Rastrojo de Maíz, Autores (2019).

La producción máxima de metano en la digestión anaerobia de esta combinación sustrato/inóculo se presentó el día 19. Con una concentración de biogás de 3.117,67 mg/L, cuyo contenido de metano fue de 1.318,53 mg/L representando un porcentaje de producción de metano del 42,29% (Tabla 26) en el biogás. Es necesario mencionar que, dentro del proceso se presentaron las siguientes fases de crecimiento microbiano reportadas por

Cendales (2001): durante los primeros cuatro días se observó la fase latente, la cual evidenció el periodo necesario para la adaptación de los microorganismos teniendo en cuenta las características del sustrato, específicamente la composición de nutrientes del rastrojo de maíz, que para este caso se determinan a partir de los estudios de nitrógeno y carbono total. En seguida, se presentó la fase exponencial de crecimiento, acorde a las capacidades de asimilación del sustrato por parte de los microorganismos, en el día 7 se presentó un aumento en la producción de metano (Figura 33) y a partir de ahí se inició la fase estacionaria donde se detectó una estabilización de producción de metano hasta el día 17, esta fase se caracteriza por la regulación del tamaño de la población microbiana. En el transcurso de esta fase, durante el desarrollo del ensayo, el último día presentó un incremento significativo en la producción de metano, lo que se puede explicar a través del comportamiento del pH, teniendo en cuenta la influencia que este parámetro tiene en el proceso de digestión anaerobia para la producción de metano. De este modo, se deduce que el TRH seleccionado no fue suficiente para visualizar con claridad la etapa de decrecimiento de los microorganismos y, en consecuencia, la reducción o detención de la producción de metano.

Tabla 26. *Porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del Rastrojo de maíz.*

Día	Mínimo	Máximo	Promedio
1	9,21	17,87	16,25
2	20,18	22,59	21,15
3	22,76	35,87	28,15
4	23,65	24,73	24,58
5	24,76	25,45	25,18
6	25,41	27,88	25,69
7	30,54	43,15	39,36
8	39,89	42,66	40,46
9	33,74	40,00	39,03
10	33,92	35,94	34,00
11	29,85	33,11	31,91
12	27,62	29,93	28,41
13	26,56	28,95	28,86
14	27,57	30,27	27,90
15	27,65	29,19	27,68
16	27,89	29,85	28,18
17	27,64	30,57	28,30
18	26,97	29,59	28,30
19	8,87	42,29	26,21

Fuente: Autores (2019)

En relación con los resultados obtenidos del monitoreo inicial y final del proceso de digestión anaerobia del rastrojo de maíz (Tabla 27), se puede inferir lo siguiente: los AGV presentaron una disminución al final del proceso con un porcentaje de remoción del 60,49%, puesto que al inicio del proceso el valor fue de 972 mg de CH₃COOH/L y al finalizar fue de 384 mg de CH₃COOH/L. A causa de la relación C/N obtenida del rastrojo de maíz, presente en el

apartado de la caracterización del sustrato, siendo esta de 25:1, se evitó la acumulación de AGV y así mismo se mantuvieron estables los niveles de pH, esta característica es atribuible cuando la relación C/N se encuentra en el rango 16:1 a 25:1 (Croce, Wei, D'Imporzano, Dong & Adani, 2016). Por lo que se refiere a la alcalinidad, el proceso inicio con un valor de 3.810 mg CaCO₃/L y finalizó con 4.150 mg de CaCO₃/L con un aumento de 340 mg CaCO₃/L, Se puede inferir que el aumento de alcalinidad se relaciona con el incremento de pH del ultimo día, esto significa una disminución en la acumulación de AGV permitiendo el desarrollo normal de la digestión anaerobia del sustrato evaluado.

El siguiente aspecto a tratar es la DQO, esta inicia con un valor de 25.275 mg O₂/L y finaliza con 4.985 mg O₂/L, El porcentaje de remoción de DQO fue de 80,27%, lo que significa que las bacterias contaban con una disponibilidad continua de nutrientes. A pesar del significativo porcentaje de remoción de materia orgánica, al finalizar el proceso se comprobó la presencia de sustrato que podía continuar siendo degradado por los microorganismos para la producción de metano en caso de haber prolongado el TRH, lo cual también explica el aumento súbito de gas metano en el día 19 del ensayo (Figura 33). En adición, esta mezcla, optimizó la configuración del biorreactor, proporcionando un soporte para las comunidades microbianas que permite aumentar la solubilidad de la DQO sin interrumpir la labor de los microorganismos (Karthikeyan, Muthu & Heimann, 2016).

En cuanto a los sólidos totales, se inició el proceso con 24,207 gST/L y finalizó con 46,515 gST/L, lo cual significó un incremento de 22,308 gST/L, dicho incremento se considera contradictorio teniendo en cuenta, el valor obtenido en sólidos volátiles, en el cual se presentó una disminución pasando de 15,854 gST/L a 9,351 gST/L con un porcentaje de remoción de 41,02%, De esta manera, se esperaba que el valor de sólidos totales también presentara una disminución, que explicaría el aumento en la producción de metano el día final del experimento. La explicación que se puede atribuir a este hecho es que en el momento de extraer la muestra para las pruebas finales de monitoreo se acumuló el sustrato en la parte baja del reactor, lugar donde se localiza la válvula para extracción de muestras, lo cual revela la modificación de los valores de solidos totales presentes al final de la operación.

6.2.1.3 Retamo Espinoso

Una vez finalizado el segundo ensayo rastrojo de maíz (sustrato) y lodo digerido (inóculo), se inició el proceso de digestión anaerobia con el retamo espinoso (sustrato) y lodo digerido (inóculo) durante los 19 días definidos para su desarrollo, como en el caso anterior se realizó el monitoreo de las variables temperatura, pH, biogás y metano, como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27. Producción de biogás y metano en la digestión anaerobia del Retamo Espinoso.

Día	T (°C)	pH	Biogás (mg/L)			Metano (mg/L)		
			Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
1	34,4	7,47	1.531,45	2.026,89	1.680,41	543,71	967,56	627,65
2	35	7,35	1.556,35	1.929,42	1.683,30	488,85	702,99	553,52
3	35	7,4	1.656,35	2.073,70	1.751,91	545,55	844,56	594,70

4	35,3	7,42	1.614,64	2.146,27	1.768,84	505,26	749,88	562,19
5	34,9	6,64	1.639,63	2.056,69	1.781,93	508,93	714,21	565,85
6	34,9	6,66	1.660,50	2.214,82	1.834,92	530,87	778,16	595,11
7	35,2	7,42	1.752,54	2.618,70	2.090,46	563,92	1.885,1	1.223,15
8	35,2	7,44	1.866,09	2.509,20	2.116,22	1.065,19	1.420,87	1.189,01
9	35	7,44	2.124,90	3.086,91	2.441,83	1.176,26	2.688,7	2.140,20
10	35	7,35	2.335,45	3.100,46	2.538,24	1.645,21	2.576,14	2.056,94
11	35	7,32	2.400,40	2.929,29	2.561,60	1.328,03	2.123,46	1.884,42
12	34,6	6,76	2.618,70	3.337,94	2.758,01	1.832,04	2.413,83	2.081,01
13	34,6	6,71	2.645,07	3.453,45	2.935,71	1.632,34	2.488,16	2.270,50
14	35	7,02	2.938,22	4.191,11	3.235,49	2.079,18	2.808,83	2.456,12
15	35,1	7,07	3.023,65	3.850,60	3.233,65	2.196,46	2.748,44	2.520,36
16	35,3	7,14	3.109,56	5.353,28	3.366,67	2.369,67	2.652,64	2.493,61
17	35,3	7,44	3.159,49	5.880,14	3.373,20	2.450,87	2.756,29	2.557,51
18	35	7,18	3.430,28	5.021,83	3.585,22	2.478,19	2.790,38	2.635,44
19	35,1	7,8	3.523,20	4.191,11	3.698,27	2.125,81	2.920,79	2.622,17

Fuente: Autores (2019)

Según la tabla anterior, el proceso registró temperatura constante, sin presentar variaciones de esta, y permaneciendo en el ambiente mesofílico definido para su operación. En lo que respecta al pH, el pH inicial es de 7,47 valor que pertenece al rango de metanogénesis, manteniéndose hasta el día cuarto, el quinto y sexto día se visualiza una disminución de pH, biogás y metano (Tabla 27) que se puede atribuir a la generación de ácidos grasos volátiles. Posteriormente, se estabiliza el pH en la fase de metanogénesis manifestando la función esencial de la alcalinidad que evita la acumulación de los AGV y neutraliza el pH, para dar continuidad al proceso normal de digestión anaerobia.

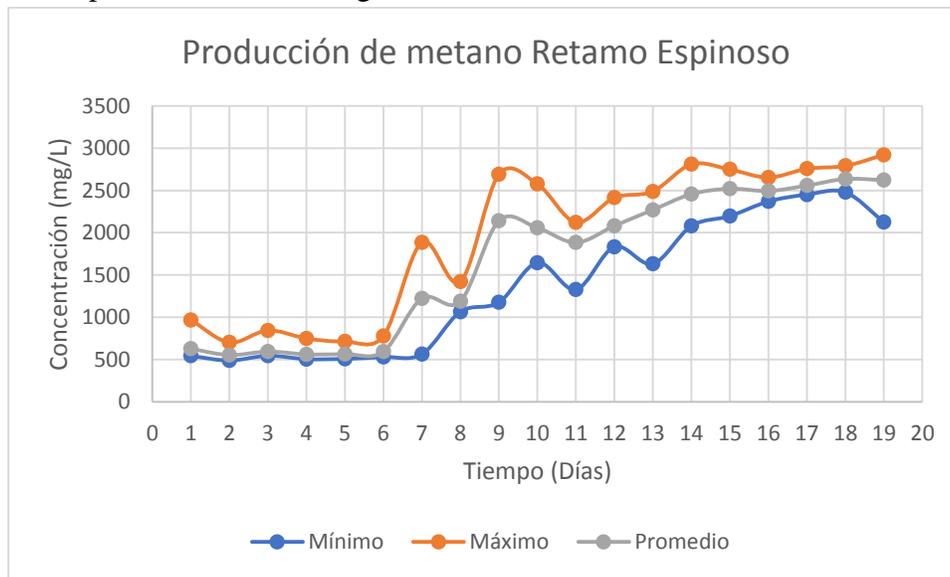


Figura 36. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia del Retamo Espinoso, Autores (2019).

Es posible afirmar que, la producción de metano inició el primer día de la digestión, esto se puede interpretar como el consumo instantáneo del sustrato por parte de las bacterias acetogénicas, en donde los ácidos orgánicos fueron utilizados por las metánogenicas como reserva de alimento y generaron el gas metano. Cabe resaltar que, el día 7 y 9, se presentan picos de producción de metano, que pueden atribuirse a la acelerado consumo del sustrato, sin embargo, en seguida de los picos, se observa una regulación en la producción que puede significar la reducción de la disponibilidad de los nutrientes, sin expresar el agotamiento, puesto que aun así el día 19, se observa un leve aumento y persistencia en la futura generación del metano.

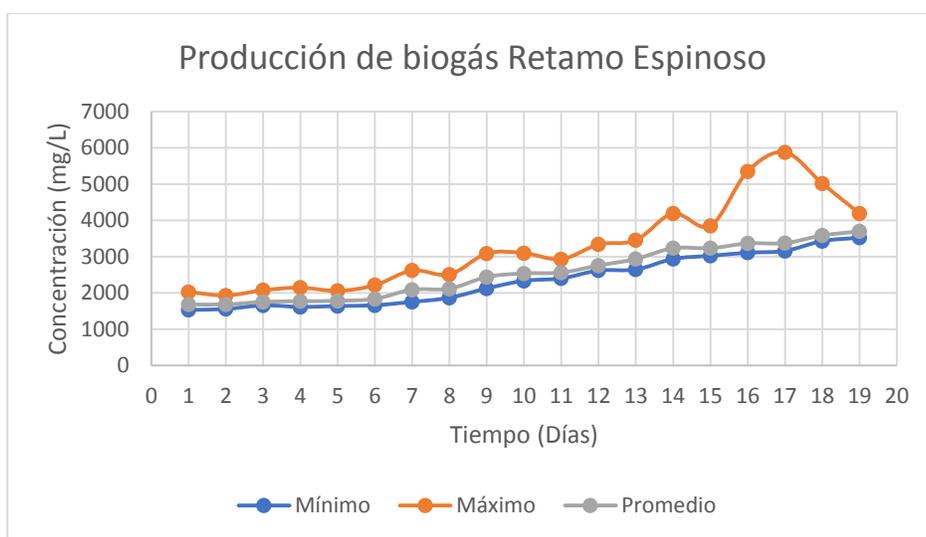


Figura 37. Producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del Retamo Espinoso, Autores (2019).

La concentración máxima de metano en la digestión anaerobia del retamo espinoso (sustrato), lodo digerido (inóculo), se generó el día 19, día final del experimento, con un valor de 2,920,79 mg/L de metano, con un porcentaje de 69,69% en el biogás. Sin embargo, el mayor porcentaje de metano presente en el biogás se obtuvo el día 9 con un valor de 87,10%, esto implica que la composición del biogás generado era en su mayoría metano, el cual supera los porcentajes reportados por Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010), los cuales son 50-75% (Tabla 5). En este ensayo, se pueden identificar las fases de crecimiento microbiano, iniciando con la fase latente del día 1 al día 6, continuando con la fase exponencial de crecimiento del día 7 al 14 y finaliza con la fase estacionaria del día 15 al 19. Del mismo modo que el ensayo anterior (rastrojo de maíz, lodo digerido), no se logra visualizar la fase exponencial de muerte y con esto la detención del proceso de producción de metano, por lo que se infiere que debió ser necesario un aumento en el TRH del proceso de digestión.

Tabla 28. Porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del Retamo Espinoso

Día	Mínimo	Máximo	Promedio
1	35,50	47,74	37,35
2	31,41	36,44	32,88
3	32,94	40,73	33,95
4	31,29	34,94	31,78
5	31,04	34,73	31,75
6	31,97	35,13	32,43
7	32,18	71,99	58,51
8	57,08	56,63	56,19
9	55,36	87,10	87,65
10	70,45	83,09	81,04
11	55,33	72,49	73,56
12	69,96	72,31	75,45
13	61,71	72,05	77,34
14	70,76	67,02	75,91
15	72,64	71,38	77,94
16	76,21	49,55	74,07
17	77,57	46,87	75,82
18	72,24	55,57	73,51
19	60,34	69,69	70,90

Fuente: Autores (2019)

Por lo que se refiere a los resultados obtenidos del monitoreo inicial y final del proceso (Tabla 27) los AGV presentaron una disminución al final del ensayo, ya que al inicio fueron de 1.032 mg CH₃COOH/L y finalizó con un valor de 300 mg CH₃COOH/L, a pesar de que la relación carbono nitrógeno para este sustrato no se encontró dentro de los rangos óptimos, no interfirió de manera negativa en la acumulación de AGV, esto puede ser atribuido a la alcalinidad como el factor amortiguador y neutralizador de los AGV. A su vez, la alcalinidad inició con un valor de 3.640 CaCO₃/L y finalizó con 3.400 CaCO₃/L, con un porcentaje de remoción de 6,59%, este factor tiene incidencia directa sobre el valor de pH (Cendales, 2011), evitando que este alcance valores ácidos.

El siguiente aspecto para tratar, es la DQO, esta inicia con un valor de 8.234 mg O₂/L y finaliza con 14.867 mg O₂/L. Lo anterior, representó un aumento de 6.633 mg O₂/L, según Amani, Nosrati, Mousavi, & Kermanshahi, (2011), los valores de DQO durante el proceso de digestión anaerobia tienden a disminuir a medida que avanza el proceso, lo que indica que

en el ensayo realizado, se presentaron irregularidades que afectaron los valores obtenidos. Dentro de estas se pueden mencionar, la diferencia en las condiciones iniciales y finales de agitación que condujo a que la muestra final se acumulara la parte del sustrato, incrementando la cantidad de sólidos y la medida de la DQO.

Acerca de los sólidos totales, se inició el proceso con 26,848 gST/L y finalizó con 6,380 gST/L, lo cual significó una disminución de 20,468 gST/L, dicha disminución favorece la movilidad bacteriana dentro del sustrato, facilitando la interacción de los microorganismos y la producción de metano. Del mismo modo, los sólidos volátiles disminuyeron en un 77,30%, lo cual significa el porcentaje de materia orgánica convertida en metano.

6.2.1.4 Variables influyentes en la digestión anaerobia del inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso.

Como se observa en la tabla 29, durante los procesos de digestión anaerobia de los diferentes ensayos se generaron remociones significativas de AGV y sólidos volátiles, hechos esenciales para la normalidad de los procesos y producción de biogás y metano. Como se ha mencionado anteriormente, la conversión biológica de los sustratos es uno de los precursores principales de la producción de biogás, la cual puede estar indicada por las disminuciones de la cantidad de materia seca del sustrato o sólidos volátiles.

Tabla 29. Resultados del monitoreo inicial y final de la digestión anaerobia del inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso.

Ensayo	DQO (mg/ L O ₂)		Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)		AGV (mg CH ₃ COOH/L)		Sólidos totales (gST/L)		Sólidos volátiles (gSV/L)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Inóculo	3.254	13.290	3.560	1.550	1.344	660	24,135	57,271	15,068	13,736
Rastrojo de maíz	25.275	4.985	3.810	4.150	972	384	24,207	46,515	15,854	9,351
Retamo Espinoso	8.234	14.867	3.640	3.400	1.032	300	26,848	6,380	15,830	3,594

Fuente: Autores (2019)

En un estudio realizado en china, acerca de la digestión anaerobia de la paja de maíz por Zhong, Zhang, Luo, Sun, Qiao & Xiao (2011), se reporta un porcentaje de remoción de sólidos volátiles de 39,65%, en la digestión anaerobia de la paja de maíz sin tratamiento durante 30 días, mientras que el valor obtenido de la remoción de SV presentada por el rastrojo de maíz en el ensayo realizado fue de 41,02% en 19 días, lo anterior, expresa una óptima remoción en el TRH establecido comparado con el estudio citado, lo que puede indicar que de haber mantenido el experimento durante un tiempo mayor, se hubiera conseguido la remoción casi total de los SV.

Por otro lado, para el ensayo con retamo espinoso se puede resaltar que esta especie al ser una leguminosa presenta altas cantidades de compuestos fenólicos solubles en agua, también

denominados taninos, que conducen a la producción de ácidos, de esta manera, estos compuestos son convertidos en CH₄ (Isaza, 2007). Como se observa en la tabla 30, los valores de remoción de AGV y SV, en el lodo digerido, fueron menores a los registrados en los ensayos del rastrojo de maíz y retamo espinoso, esto, puesto que no hay presencia de nutrientes disponibles que puedan ser aprovechados por los microorganismos facilitando el proceso de digestión anaerobia y de allí la producción de metano.

Tabla 30. Resultados del proceso de digestión anaerobia del inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso.

Ensayo	AGV (mg CH ₃ COOH/L)		Remoción AGV (%)	Sólidos volátiles (gSV/L)		Remoción (%)
	Inicial	Final		Inicial	Final	
Inóculo	1.344	660	50,89	15,068	13,736	8,78
Rastrojo de maíz	972	384	60,49	15,854	9,351	41,02
Retamo Espinoso	1.032	300	70,93	15,830	3,594	77,30

Fuente: Autores (2019)

Como se ha mencionado anteriormente, el pH es uno de los parámetros que aportan mayor estabilidad en la actividad microbiana. En la gráfica que se muestra a continuación, se puede observar que el inóculo inicia el proceso de digestión anaerobia con un pH menor en comparación con las combinaciones de rastrojo de maíz y retamo espinoso, situándolo como el único ensayo en el que se evidenció la acción de las bacterias acidogénicas, Mientras que en los otros dos ensayos (rastrojo de maíz y retamo espinoso), arrancaron en fase metanogénica con algunas fluctuaciones, Cabe resaltar que a partir del día 12, en los 3 ensayos realizados se logra distinguir la estabilización del pH, y con ello la fase metanogénica del proceso que se lleva a cabo.

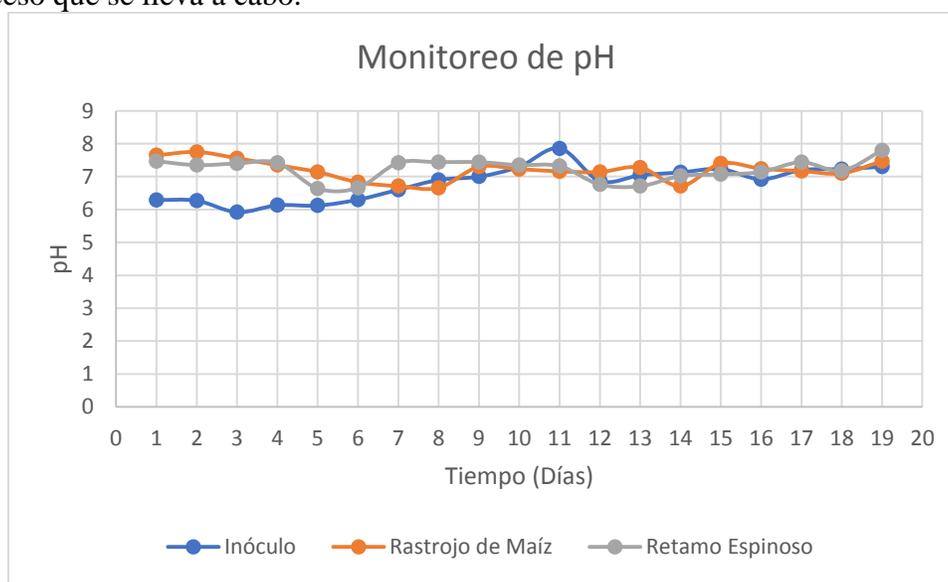


Figura 38. Monitoreo de pH, Autores (2019)

A partir de la figura 37, se puede observar que, en el periodo final de los experimentos, el pH para todos los ensayos realizados (blanco o inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso) aumenta, este comportamiento concuerda con los resultados reportados por Geogarcakis, Sievers & Ianotti (1982), citado por Cendales (2011) quienes puntualizaron tendencias similares para el pH en el proceso de digestión anaerobia de estiércol bovino. A partir de allí, definieron la relación existente entre el valor de pH y el contenido de ácidos grasos volátiles, en donde a medida que disminuyen los AGV, se observa un incremento en el pH y la producción de metano. Por último, se observa un leve aumento en el pH en los días finales del TRH estipulado para los procesos, esto concuerda con lo reportado por Cendales, (2011), el cual atribuye este hecho a la disminución de AGV, como consecuencia de la acción de los sistemas amortiguadores.

6.2.1.5 Comparación de los ensayos de digestión anaerobia

A partir de los resultados obtenidos al finalizar los procesos de digestión anaerobia de los sustratos utilizados, se puede afirmar, que el comportamiento de la producción de biogás con el rastrojo de maíz fue uniforme, sin evidencias de aumentos significativos, como ocurrió en el caso del retamo espinoso, el cual registró picos de producción en los días 7, 9 14 y 17, Cabe aclarar, que el proceso llevado a cabo por el retamo espinoso, presentó la mayor producción de biogás comparado con el rastrojo de maíz, esto debido a la composición química del retamo espinoso, el cual al contener polifenoles vegetales, que son metabolitos secundarios localizados en plantas superiores de la familia Leguminosae a la que pertenece el retamo espinoso, presenta un alto contenido de ácidos orgánico, que en la fase de acetogénesis son transformados en H₂ y CO₂, para finalmente convertirse en metano (Isaza, 2007) como era mencionado anteriormente.

Como se mencionó, la producción de biogás del rastrojo de maíz se mantuvo uniforme, la razón que puede explicar este hecho, pudo deberse a que el rastrojo de maíz no fue sometido a un pre tratamiento teniendo en cuenta que este sustrato se caracteriza por ser un sustrato lignocelulósico (Huang, Jeuck, & Yong, 2017), si bien en esta investigación no se realizó un análisis de contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, según lo reportado por Zhong et al (2011) algunos de los materiales lignocelulósicos se caracterizan por presentar resistencia ante el procesos de digestión anaerobia por lo que el biogás es producido en bajas cantidades. Esto se debe a que la lignocelulosa es la matriz compleja y rígida de las células vegetales ya que como lo menciona proporciona rigidez al tejido vegetal (Huang, Jeuck, & Yong, 2017), por tanto, se presenta una estrecha relación entre los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa, y aunque la celulosa y la hemicelulosa pueden degradarse en los procesos de biogás, la lignina no puede degradarse en condiciones anaeróbicas.

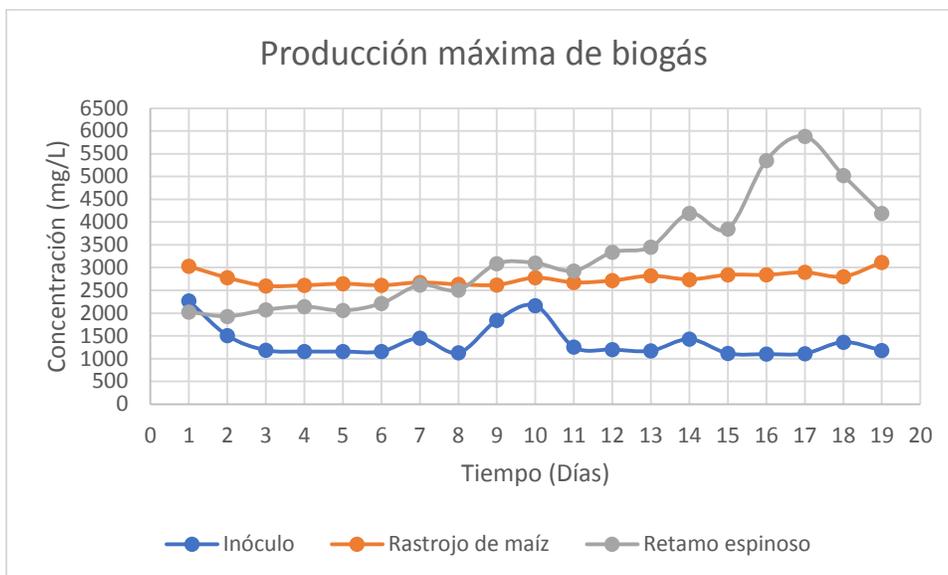


Figura 39. Producción máxima de biogás, Autores (2019),

Ahora bien, así como el retamo espinoso presentó la mayor producción de biogás también presentó la mayor producción de metano en términos de concentración y porcentaje (Figura 39-40), lo cual confirma la hipótesis nula planteada en la presente investigación. Es importante mencionar, que además de poseer polifenoles como se mencionaba en un principio, el retamo espinoso se caracteriza por poseer azúcares y polisacáridos altamente solubles, lo que le otorga una capacidad para llevar a cabo la degradación y producción de alcoholes orgánicos, ácidos, y gases, entre otros (Celis, 2014) citado por (Aldana Páez, 2015). Así mismo el retamo presentó la mayor remoción de AGV, como era mencionado en el apartado anterior, lo que se traduce en una mayor conversión de ácidos a metano, intensificando la producción de este. Por otro lado, si bien, el rastrojo de maíz también presentó una significativa remoción de ácidos sobrepasando el 50%, no se refleja una representativa producción de metano, sino por el contrario mantiene un flujo estable de producción.

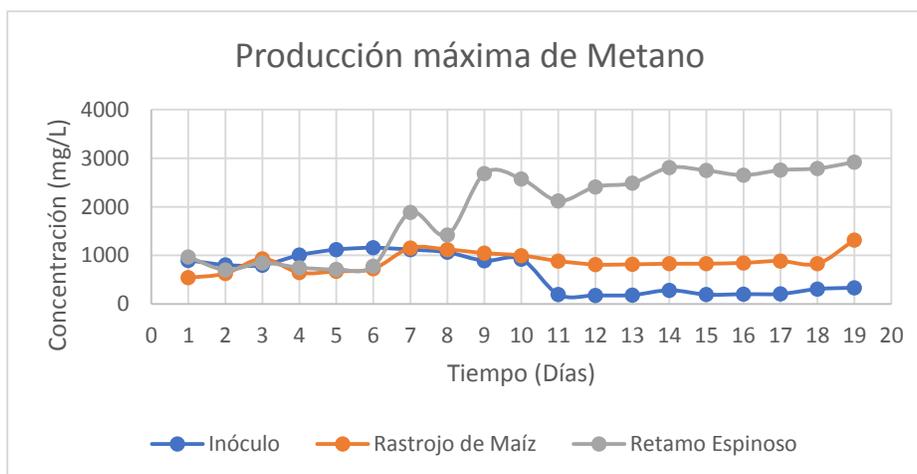


Figura 40. Producción máxima de metano, Autores (2019),

En el estudio realizado por Fonseca Padilha (2017), la producción máxima de metano en la digestión anaerobia del rastrojo de maíz a lo largo de 30 días, fue de 55,35%, sin embargo en el ensayo llevado a cabo en el presente estudio, se obtuvo un valor de 43,15%, en un TRH de 19 días, de esta manera, se juzga pertinente la extensión del tiempo de retención con el fin de obtener mayor porcentaje de metano, y así poder ser utilizado como fuente alternativa de energía al ser sometido por el tratamiento de purificación necesario. Por otro lado, Costa, Oliveira, & Alves (2016), el porcentaje de metano alcanzado a partir de la digestión del retamo espinoso fue de 80% en 45 días, en el presente caso, la producción máxima fue de 87,10% en 19 días de operación.

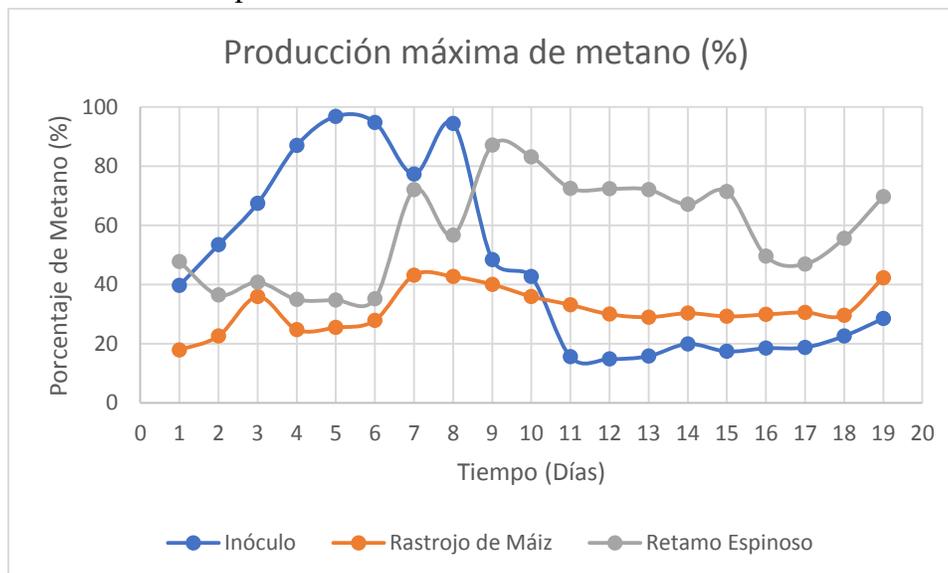


Figura 41. Producción máxima de metano en porcentaje, Autores (2019)

En resumen, se puede afirmar que, al iniciar el proceso de digestión anaerobia, tanto el inóculo, como el rastrojo de maíz y retamo espinoso, pasaron por un periodo de fluctuaciones en cuanto a las producciones máximas de metano presentes en el biogás producido. Sin embargo, se destaca la máxima producción de metano en la digestión anaerobia del retamo espinoso, cuya producción en términos de concentración fue de 5880,14 mg/L, el día 17 de la operación, del mismo modo es en el proceso llevado a cabo por este sustrato que se obtiene el mayor porcentaje de metano presente en el biogás, comprobando así, la hipótesis de investigación planteada en donde se afirmó que el porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del rastrojo de maíz sería menor al obtenido por el retamo espinoso, este porcentaje se manifiesta en el día 9 y fue de 87,10%, con concentraciones de 2688,7 mg/L y 3086,91 mg/L de biogás y metano respectivamente. Por otro lado, la mayor producción de biogás en el proceso de digestión del rastrojo de maíz ocurrió el día 19, con 3117,67 mg/L, el mayor porcentaje de metano se presentó el día 7, con un valor de 43,15%, las concentraciones registradas de biogás y metano fueron de 2673,86 mg/L y 1153,86 mg/L respectivamente.

7 Conclusiones

La utilización del biorreactor como instrumento en el proceso de digestión anaerobia, facilitó el desempeño y monitoreo de los ensayos realizados. Por un lado, el sistema de control de temperatura ajustado aseguró que el proceso se llevará a cabo en un ambiente mesofílico, sin variaciones significativas de temperatura, que alteraran el curso de la digestión anaerobia. Por otro lado, la sonda de pH en conexión con el circuito de Arduino mega, permitió, conocer los valores de pH durante cada uno de los procesos evaluados, y de esta manera inferir la fase de la digestión, que se estaba desarrollando en cada uno de ellos y relacionar dicha variable con la producción de metano y biogás.

Además, es importante mencionar que el método de medición de biogás por desplazamiento de volumen de agua, incorporado en biorreactor presentó fugas y escapes en sus compartimientos, razón por la cual, impidió la toma de datos de volumen del biogás, por tal motivo, los datos analizados se presentaron en unidades de concentración, que fueron registradas por el sensor MQ-2 implementado de manera adicional. Cabe resaltar, que la introducción del módulo SD, fue de gran utilidad para el almacenamiento de los datos, sin embargo, no permitió identificar de manera oportuna los fallos en el sistema o alteraciones en los datos obtenidos, durante los procesos realizados, puesto que era necesario extraer la memoria, para examinar su contenido, al finalizar cada operación.

Dentro de la caracterización física y química realizada para el inóculo y los sustratos utilizados, se destaca la importancia de los sólidos totales y volátiles en la determinación de la materia orgánica biodegradable y la facilidad de los microorganismos para interactuar en el proceso de digestión anaerobia. Asimismo, la relación C/N, es parte fundamental en la elección del sustrato, puesto que permite que los microorganismos maximicen la producción de biogás al aportar los nutrientes necesarios para su desarrollo. Puntualmente el rastrojo de maíz presentó una relación C/N, del rastrojo de 25:1, mientras que el retamo espinoso obtuvo una relación C/N de 38:1. En este caso, el rastrojo de maíz se ubica en el rango óptimo de C/N, situándolo como un sustrato ideal en la disponibilidad de nutrientes para el proceso de digestión anaerobia.

Sumado a esto, el proceso de digestión anaerobia de la especie invasora Retamo Espinoso (*Ulex Europaeus*), en conjunto con el lodo anaerobio digerido, produjo la mayor cantidad de biogás en términos de concentración siendo esta de 5880,14 mg/L, el día 17 de la operación, del mismo modo es en el proceso llevado a cabo por este sustrato que se obtiene el mayor porcentaje de metano presente en el biogás, comprobando así, la hipótesis de investigación planteada en donde se afirmó que el porcentaje de metano presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del rastrojo de maíz sería menor al obtenido por el retamo espinoso, este porcentaje se manifiesta en el día 9 y fue de 87,10%, con concentraciones de 2688,7 mg/L y 3086,91 mg/L de biogás y metano respectivamente. Por otro lado, la mayor producción de biogás en el proceso de digestión del rastrojo de maíz ocurrió el día 19, con 3117,67 mg/L, el mayor porcentaje de metano se presentó el día 7, con un valor de 43,15%, las concentraciones registradas de biogás y metano fueron de 2673,86 mg/L y 1153,86 mg/L respectivamente.

En lo que respecta a la remoción de AGV y SV, los tres ensayos realizados presentaron disminución en sus valores con respecto a los datos iniciales de dichas variables, sin embargo, el proceso de digestión anaerobia que presentó el mayor porcentaje de remoción de AGV Y SV fue el del retamo espinoso, el cual inició con 1.032 mg CH₃COOH/L y finalizó con 300 mg CH₃COOH/L, es decir, tuvo un porcentaje de remoción de 70,93%, en cuanto a los sólidos volátiles SV, éste inició con 15,830 gSV/L y terminó con 3,594 gSV/L, esto representa una remoción de 77,30%.

Finalmente, a partir de la digestión anaerobia de los sustratos evaluados, se puede afirmar que estos representan una fuente alternativa de producción de metano, que con su debido tratamiento puede llegar a convertirse en una fuente de energía no convencional, capaz de contribuir en el manejo y aprovechamiento adecuado de residuos agrícolas, así como una estrategia de control de la especie invasora retamo espinoso. De ser así, este tipo de energía representaría una oportunidad para satisfacer las necesidades energéticas de las comunidades ubicadas en las zonas rurales o zonas no interconectadas, al ser una tecnología de bajo costo y fácil acceso.

8 Recomendaciones

- En la caracterización física y química de los sustratos se recomienda realizar estudios de determinación del contenido de lignina, celulosa, hemicelulosa, que permitan conocer de manera asertiva la composición y comportamiento del sustrato en el proceso de digestión anaerobia, asimismo, evaluar su contribución en el aumento o disminución en la producción de biogás.
- Con el fin de evidenciar las fases de crecimiento microbiano y la detención del proceso de producción de metano, se sugiere prolongar el tiempo de retención hidráulica para observar de manera detallada el momento exacto de la estabilización de la digestión anaerobia en un ambiente mesofílico.
- Con respecto al monitoreo de las variables de ácidos grasos volátiles, DQO, alcalinidad, es importante realizar su medición diariamente con el fin de reconocer a partir de la correlación de estas variables, el comportamiento de cada una de las fases (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) en el proceso de digestión anaerobia.
- Para el almacenamiento del biogás, se recomienda la instalación de gas-bags, o bolsas de reserva de gas, con el objetivo de acumular el gas generado y evitar las fugas y con esto la pérdida de datos valiosos para el proceso de producción de metano y su correspondiente análisis.
- Para la medición del volumen y composición del biogás producido, se aconseja utilizar el método de cromatografía de gases, debido a su nivel de confiabilidad y facilidad de análisis, dado que la medición por desplazamiento de volumen de agua abarca mayor tiempo, espacio, consumo de reactivos
- Se recomienda disminuir el tamaño de los sustratos antes de iniciar el proceso de digestión anaerobia con el fin de facilitar su biodegradabilidad y con ello la disponibilidad de nutrientes para el consumo de los microorganismos y por consiguiente aumentar la producción de metano.

- Uno de los productos de la digestión anaerobia es el biogás, el cual puede ser utilizado como fuente de energía eléctrica o combustible, para su utilización es necesario realizar la purificación del gas, eliminando así los componentes tóxicos, del mismo modo es necesario distinguir su composición a partir de análisis de laboratorio. Por otro lado, se debe seguir el mismo procedimiento con el subproducto o biol, en caso de querer ser utilizado como biofertilizante.
- Se sugiere realizar un ensayo utilizando una cama de sustrato en el tanque externo del biorreactor, combinando el rastrojo de maíz y el retamo espinoso, con el fin de estudiar la posibilidad de sustituir el calentamiento proporcionado por la resistencia eléctrica por la temperatura generada a partir de la descomposición de los sustratos y de esta manera reducir los costos de operación de la producción de metano.
- Se propone estudiar la posibilidad de utilizar el biogás generado como contribuyente en el sistema de calentamiento que provee la resistencia incorporada en el biorreactor, de modo que pueda ser recirculado y aprovechar su poder calorífico.

9 Referencias bibliográficas

- Acosta, Y. L. & Obaya, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.
- Alcaldía Municipal de Pasca. (2016). Plan de desarrollo “PASCA SOMOS TODOS” 2016-2019. Recuperado de https://pascacundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/pascacundinamarca/content/files/000229/11416_plan-de-desarrollo-pasca-somos-todos-20162019-final-aprobado.pdf
- Aldana Páez, M. F. (2015). Experimental Analysis of the Energetic Potential of the species *Ulex Europaeus* and its blending with waste tire rubber by Pyrolysis. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Amani, T., Nosrati, M., Mousavi, S. M., & Kermanshahi, R. K. (2011). Study of syntrophic anaerobic digestion of volatile fatty acids using enriched cultures at mesophilic conditions. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 8, 83-90 . Recuperado el 09 de Octubre de 2019, de <https://link-springer-com.ezproxy.unbosque.edu.co/content/pdf/10.1007%2F03326198.pdf>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2017). Resolución No 01470 de 17 de noviembre de 2017. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). Recuperado de http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_1470_17112017.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2019). *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2019, de <http://www.anla.gov.co/>
- Amaya-Villarreal, Á. M., & Renjifo, L. M. (2010). Efecto del retamo espinoso (*Ulex europaeus*) sobre las aves de borde en un bosque altoandino. *Ornitología Colombiana*, 10, 11-25.
- Appels, L., Lauwera, J., Degreève, J., Helsenb, L., Willemsc, K., & Dewila, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295 – 4301. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121>
- Ávalos García, A., & Pérez-Urria , E. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal.*, 2(3), 119-145.
- Aydin, S. (2017). Anaerobic Digestion en L. Singh & V. Chandra Kalia, *Waste Biomass Management- A Holistic Approach* (págs. 1-15). New Delhi, India: Springer International Publishing AG.
- Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 10). E. W. Rice (Ed.). Washington, DC: American Public Health Association.

- Barboza, L. S., Pineda, R. E. P., & Stanescu, C. V. (2017). Eficiencia de países desarrollados en el control del uso de combustibles fósiles para generar energía. *Revista Científica ECOCIENCIA*, 4(2).
- Baptiste, M. P., Castaño, N., Cárdenas, D., Gutiérrez, F.P., Gil, D.L., y Lasso C.A. (2010). Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Bogotá, D.C. Colombia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Bose, D., Kandpal, V., Dhawan, H., Vijay, P., & Gopinath, M. (2018). Energy Recovery with Microbial Fuel Cells: Bioremediation and Bioelectricity. En S. Varjani , & E. Gnansounou, *Waste Bioremediation* (págs. 7-33). Gateway East, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- BP. (2017). Statistical Review of World Energy June 2017. Recuperado de <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statisticalreview-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- Bueno, M., Rodríguez, L. C., & Rodríguez, P. J. (2016). Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano. *Ingeniería y Desarrollo*, 34 (2), 397-419.
- Cadavid, L., & Bolaños, I. (2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. *Energética*, (46), 23-28
- Cámara de Comercio de Cali. (2016). Normatividad para las Energías Renovables en Colombia. Informe económico. Recuperado de <https://www.ccc.org.co/file/2016/04/Ritmo-Bioenergia-Bioenergia.pdf>
- Candia-García, C., & Delgadillo-Mirquez, L. (Mayo de 2018). Biodegradation of rice straw under anaerobic digestion. *Environmental Technology & Innovation*, 10, 215-222. Recuperado el 05 de Mayo de 2019, de <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S2352186417302079#b15>
- Castro, J. J., & Cervera, J. R. (2014). *Formulación de indicadores de sostenibilidad para la erradicación de la especie retamo espinoso (Ulex europeus) en las áreas afectadas de los cerros ambientales de Bogotá*. (Tesis de especialización, Universidad Libre). Recuperado de [https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/10650/PROYECTO_GRA DO_GERENCIA_AMBIENTAL_2014\(IS.RETAMO\).pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/10650/PROYECTO_GRA DO_GERENCIA_AMBIENTAL_2014(IS.RETAMO).pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cazaudehore, G., Schraauwers, B., Peyrelasse, C., Lagnet, C., & Monlau, F. (15 de Noviembre de 2019). Determination of chemical oxygen demand of agricultural wastes by combining acid hydrolysis and commercial COD kit analysis. *Journal of Environmental Management*, 250. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109464>

- Cendales Ladino, E. D. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>
- Chu, X., Wu, G., Wang, J., & Hu, Z.-H. (Diciembre de 2015). Dry co-digestion of sewage sludge and rice straw under mesophilic and thermophilic anaerobic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 20143–20153. Recuperado el 07 de Agosto de 2019, de <https://link-springer-com.ezproxy.unbosque.edu.co/article/10.1007/s11356-015-5074-6>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG - DRA. (2017). *Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG - DRA*. Recuperado el 09 de Octubre de 2019, de <http://www.creg.gov.co/creg/quienes-somos/objetivo>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG - DRA (2009). Regulación aplicable al Biogás. Documento CREG 0-56. Recuperado de <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c/c425809c8d0c0872052>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2018). *Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)*. Obtenido de <https://www.car.gov.co/vercontenido/3>
- Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 3. Acceso em 14 de Mayo de 2019, disponible em http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007
- Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia política*, 13(25), 107-125. doi: <https://doi.org/10.15446/cp.v12n25.70257>
- Costa, J. C., Oliveira, J. V., & Alves, M. M. (2016). Response surface design to study the influence of inoculum, particle size and inoculum to substrate ratio on the methane production from *Ulex* sp. *Renewable Energy*, 96, 1071-1077. Recuperado el 5 de Mayo de 2019, de <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0960148115303815>
- Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016). Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 34(8), 1289-1304
- Delgado, W.G. (2009). *Caracterización del proceso de transferencia y adopción tecnológica de pequeños y medianos productores de cebolla (Allium cepa L) en el municipio de*

- Pasca (Cundinamarca)*. (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana). Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/134/eam1.pdf?sequence=2>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (DANE). (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/centso-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/donde-estamos>
- Díaz, M. C., Espitia, S. E., & Molina, F. (2002). *Digestión Anaerobia: una aproximación a la tecnología*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de http://bdigital.unal.edu.co/43178/11/Digestion%20anaerobia_Parte%202.pdf
- Dukes, J., & Mooney, J.H. (2004). Disruption of ecosystem processes in western North America by invasive species. *Revista Chilena de Historia Natural*, (77), 411-437.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (14 de Agosto de 2019). *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)*. Obtenido de <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB>
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H. J., Cardona, M. C., & Duarte, M. (2011). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. *Bucaramanga: Ministerio de Minas y Energía*. Recuperado de <https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/ATLAS%20POTENCIAL%20ENERGETICO%20BIOMASA%20RESIDUAL%20COL.%20UPME.pdf>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. (2010). *Guía Prática do Biogás*. Gülzow: Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum. Recuperado el 12 de Mayo de 2019.
- Ferrer, Y., & Pérez, H. (2010). Los microorganismos en la Digestión Anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, 43(1), 9-20. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120681002.pdf>
- Fonseca Padilha, R. (2017). *Definição dos parâmetros de dimensionamento e de operação de um Biodigestor Anaeróbio piloto para produção de biogás no tratamento de palha de milho*. Belo Horizonte: UFMG.
- Gensa. (2019). Línea del tiempo. Recuperado de <https://www.gensa.com.co/linea-de-tiempo/#>
- González-Suárez, A., Da Silva, A., Oliva-Merencio, D., & Pereda-Reyes, I. (2014). Producción de biogás a partir de la monodigestión de la paja de maíz – Efecto de adición de mineral natural. *Conference: XI Latinamerican Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion (XI DAAL)*. Recuperado el 2019 de Abril de 21, de

https://www.researchgate.net/publication/273937725_Produccion_de_biogas_a_partir_de_la_monodigestion_de_paja_de_maiz-_Efecto_de_la_adicion_de_mineral_natural/download

- González, J. R. & González, L. E. (2015). Biomasa: métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. *Revista I3+*, 2(2), 28-44.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). México D.F.: Mc Graw Hill Education. Acceso em 01 de Octubre de 2019
- Henrysson, T., Mattiasson, B., & Björnsson, L. (14 de Febrero de 1997). Effects of support material on the pattern of volatile fatty acid accumulation at overload in anaerobic digestion of semi-solid waste. *Appl Microbiol Biotechnol*, 640-644. Recuperado el 02 de Octubre de 2019
- Horan, N., Wid, N., & Yaser, A. Z. (2018). *Anaerobic Digestion Processes Applications and Effluent Treatment*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. doi:<https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3>
- Huang, C., Jeuck, B., & Yong, Q. (2017). Using Pretreatment and Enzymatic Saccharification Technologies to Produce Fermentable Sugars from Agricultural Wastes. En L. Singh, & V. Chandra Kalia, *Waste Biomass Management – A Holistic Approach* (págs. 15-38). New Delhi, India: Springer International Publishing AG.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2014). *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt*. Obtenido de <http://www.humboldt.org.co/es/instituto/que-hacemos/acerca-del-instituto>.
- Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). (2010). *Manual de Técnicas Analíticas para Análisis de Suelo, Foliar, Abonos orgánicos y Fertilizantes Químicos*. La Habana, Cuba: Ediciones INCA.
- Isaza, J. H. (2007). Taninos o polifenoles vegetales. *Scientia et Technica*, 1(33).
- ITW Reagents. (2018). Determinación del nitrógeno por el Método Kjeldahl. Recuperado de https://www.itwreagents.com/uploads/20180122/A173_ES.pdf
- Jardín Botánico José Celestino Mutis. (2015). *Restauración ecológica: Protegiendo los ecosistemas de la localidad de San Cristóbal de los incendios forestales y del retamo espinoso*. Bogotá, D.C.: Jardín Botánico José Celestino Mutis, Bogotá.
- Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. (2019). *Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis*. Recuperado el 09 de Octubre de 2019, de <http://www.jbb.gov.co/index.php/nuestro-jardin/mision-y-vision>

- Jugal Sukhesh, M., & Venkateswara Rao, P. (2018). Anaerobic Digestion of Crop Residues: Technological Developments and Environmental Impact in the Indian Context. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*.
- Jyothilakshmi , R. A., & Prakashb, S. (2016). Design, Fabrication and Experimentation of a Small Scale Anaerobic Biodigester for Domestic Biodegradable Solid Waste with Energy Recovery and Sizing Calculations. *Procedia Environmental Sciences* , 749-755.
- Karthikeyan, O. P., Muthu, S. S., & Heimann, K. (2016). *Recycling of solid waste for biofuels and bio-chemicals*. Springer.
- Kibria, A., Akhundjanov, S. B., & Oladi, R. (2019). Fossil fuel share in the energy mix and economic growth. *International Review of Economics & Finance*, 59, 253-264. Doi:
- Li, Y., Chen, Y., & Wu, J. (2019). Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *Applied energy*, 240, 120-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
- Mao, C., Xi, J., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (Marzo de 2019). Biogas production and synergistic correlations of systematic parameters during batch anaerobic digestion of corn straw. *Renewable Energy*, 132, 1271-1279. Recuperado el 07 de Agosto de 2019, <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0960148118310723>
- Martina, P., Aeberhard, R., Corace, J., & Bucki Wasserman , B. (2011). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALORÍMETRO DE JUNKERS PARA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, 09-14.
- Martínez , E., Fuentes, J. P., & Acevedo H., E. (2008). CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martinez, S., Numpaque, H., & Alvarado, J. (2016). Efecto de la Temperatura en la Producción de Biogás en un Bioreactor tipo Batch a través de la Descomposición Anaeróbica de Residuos Sólidos Orgánicos. *ENGI Revista Electrónica de la Facultad de Ingeniería*, 3(1).
- Maya, E. (2014). *Métodos y técnicas de investigación*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 03 de Octubre de 2019.
- McKean, S. J. (1997). Manual de análisis de suelos y tejido vegetal: una guía teórica y práctica de metodologías. Recuperado de http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/S593.M2_Manual_de_an%C3%A1lisis_de_suelos_y_tejido_vegetal_Una_gu%C3%ADa_te%C3%B3rica_y_pr%C3%A1ctica_de_metodologia.pdf

- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (20 de Mayo de 2019). *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. Obtenido de <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/quienes-somos/Paginas/Quienes-somos.aspx>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2019). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/ministerio/mision-y-vision>
- Møller, H. B., Sommer, S. G., & Ahring, B. K. (2004). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and bioenergy*, 26(5), 485-495. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.008>
- Morita , T., & Assumpção, R. (2001). *Manual de Soluções, Reagentes & Solventes: Padronização - Preparação - Purificação*. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher Ltda.
- Nakasima-López , M., Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., & Velázquez-Limón, N. (2017). Adaptación de Inóculos Durante el Arranque de la Digestión Anaerobia con Residuos Sólidos Orgánicos. *Información tecnológica*, 28(1), 199-208. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000100020>
- Ocampo, K. (2019). Modelo descriptivo de restauración ecológica en zonas afectadas por incendios forestales e invasión de retamo espinoso en los cerros orientales de Bogotá. *Acta Biológica Colombiana*, 24(1), 1-12. doi: <https://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n1.71953>
- Olaya, Y., & González, L. O. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Recuperado de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.edukations.com/wp-content/uploads/2019/01/Fundamentos-de-biodigestores.pdf>
- Orobio, B. A. P., Lozada, P. T., Rebellón, L. F. M., Cleves, L. M. C., Franco, C. V., López, W. A. T., & Andrade, J. A. O. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2).
- Oshiro, T. L. (2016). *Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos*. (Tesis de pregrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Recuperado de http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5480/1/LD_COEAM_2016_1_16.pdf
- Park, G. W., Kim, I., Jung, K., Seo, C., Han, J.-I., Chang, H. N., & Kim, Y.-C. (13 de Marzo de 2015). Enhancement of volatile fatty acids production from rice straw via anaerobic digestion with chemical pretreatment. *Bioprocess Biosyst Eng*, 1623–1627. doi:10.1007/s00449-015-1387-6

- Pascual Vidal, A., Ruiz Fuertes, B., Fernandez, B., Palatsi, J., Flotats, X., Benandallah, T., . . . Mata, J. (2009). *Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales*. Oviedo, España: PSE PROBIOGAS. Obtenido de http://www.canseixanta.cat/zi.arxiu/apergas.cat/textweb/00000070/PROBIOGAS_Manual%20de%20Estado%20del%20Arte.pdf
- Pereira, V., Ferreira, J. M., Martínez G. A. S., & Tomachuk, C. R. (2015). Avaliação de sistema de columnas para remediação de biogás a partir de biomassa não digerida. *HOLOS*, 8, 242-251. doi: <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2688>
- Pinilla, A. (2016). Soluciones energéticas para zonas rurales (¿En el posconflicto?). *Revista de ingeniería*, (44), 36-39.
- Puertas, Y. (2016). *Electrificación sostenible de Zonas No Interconectadas del Pacífico Colombiano, por medio de clusters prototipo de sistemas híbridos solar-eólico-hidro-diésel optimizados con homer*. (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana). Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/20475/PuertasGonzalezYurani2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ramírez, H., Mesa, C., García, C., & Valero, R. (2015). ¡Así viven los Cerros! Experiencias de habitabilidad. Recuperado de <https://www.habitatbogota.gov.co/sites/default/files/documentos/Experiencias-de-habitabilidad-cerros.pdf>
- Reyes, L., Camacho, T. C., & Guevara, F. (Coords). (2013) Rastrojos: manejo, uso y mercado en el centro y sur de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico Núm. 7. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. i-viii, 1-242 p. Recuperado de https://www.zef.de/uploads/tx_zefportal/Publications/tbeuchelt_download_Rastrojos%20manejo,%20uso%20y%20mercados%20en%20el%20centro%20y%20sur%20de%20M%C3%A9xico.pdf
- Ríos, H. F., Hurtado, G. H., & Solorza, J. H. (2013). *Estrategia regional para el manejo del riesgo por invasión de retamo*. Bogotá, Colombia: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Roldán, J. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber*. Recuperado de <https://books.google.es/books?id=yKh2AgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp.)*, 104, 331-345.

- Steve, N. (2011). *Energización de las Zonas No Interconectadas a partir de las renovables solar y eólica*. (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana). Recuperado de <https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/eambientales/tesis121.pdf>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios). (2017). Zonas No Interconectadas (ZNI). Diagnóstico de la prestación de servicio de energía eléctrica 2017. Recuperado de <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Sep/diagnosticozni-superservicios-oct-2017.pdf>
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (1997). Energización rural. Una realidad al alcance de las comunidades. Recuperado de https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1077/1/Upme_060_Energizacion%20rural.pdf
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Recuperado de http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- Universidad El Bosque. (2018). Informe de sostenibilidad 2015-2017. Recuperado de <https://www.unbosque.edu.co/sites/default/files/2018-11/Informe%20de%20sostenibilidad%202018.pdf>
- Universidad El Bosque (UEB). (2019). *Universidad El Bosque (UEB)*. Obtenido de <https://www.unbosque.edu.co/home>
- Varjani, S. J., Gnansounou, E., Baskar, G., Pant, D., & Akmar Zakaria, Z. (2018). *Waste Bioremediation*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Varnero, M. M. T. (2011). Manual del Biogás FAO. Chile. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Vieira Serufo, C. (2019). RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS VIA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Wahid, Z. A., & Islam Siddique, M. N. (01 de Septiembre de 2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of Cleaner Production*, 194, 359-371. Acceso em 14 de Mayo de 2019, disponível em <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0959652618314951#!>
- Wang, X., Li, Z., Bai, X., Zhou, X., Cheng, S., Gao, R., & Sun, J. (Febrero de 2018). Study on improving anaerobic co-digestion of cow manure and corn straw by fruit and vegetable waste: Methane production and microbial community in CSTR process. *Bioresource Technology*, 249, 290-297. Recuperado el 07 de Agosto de 2019, de

<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0960852417318576#!>

Wilder, B. H., Costa, H. S., Kosmowski, C. M., & Purcell, W. E. (2011). *Standard Methods Committee, 1997. Editorial revisions, 2011*. Joint Task Group: 20th Edition.

Zhang, Y., Xu, L., Liang, Y.-g., Yang, S., & Liu, X.-h. (Mayo de 2019). Evaluation of Semi-dry Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Corn Stover and Vegetable Waste by a Single-Phase Process. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 1159–1166. Recuperado el 08 de Agosto de 2019, de <https://link-springer-com.ezproxy.unbosque.edu.co/article/10.1007/s12649-017-0133-5>

Zhong, W., Zhang, Z., Luo, Y., Sun, S., Qiao, W., & Xiao, M. (2011). Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresource technology*, 102(24), 11177-11182.

Zupancic , G. D., & Ros, M. (07 de Agosto de 2011). Determination of Chemical Oxygen Demand in Substrates from Anaerobic Treatment of Solid Organic Waste. *Waste Biomass Valor* , 89-98. doi:10.1007/s12649-011-9087-1