

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOGÁS, A PARTIR DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL CO-SUSTRATO
CASCARILLA DE ARROZ CON EXCRETAS PORCINAS



GUTIÉRREZ NIÑO LAURA CATALINA
OCHOA NOGUERA LAURA DANIELA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOGÁS, A PARTIR DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL CO-SUSTRATO
CASCARILLA DE ARROZ CON EXCRETAS PORCINAS

GUTIÉRREZ NIÑO LAURA CATALINA
OCHOA NOGUERA LAURA DANIELA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera ambiental

Director:
PhD. Msc. Ing. CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
VILLAVICENCIO

2019

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Arturo RESTREPO RESTREPO O.P

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRAN O.P

Decana de la Facultad de Ingeniería Ambiental

NOTA DE ACEPTACIÓN

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de facultad

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director trabajo de grado

HENRY CONTRERAS LEÓN

Jurado

CARLOS DAVID GÓMEZ ORTIZ

Jurado

Villavicencio, agosto 2019.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	13
2. Planteamiento del Problema.....	14
2.1. Descripción del Problema	14
2.2. Formulación entorno al problema	16
3. Objetivos	17
3.1. Objetivo General	17
3.2. Objetivos Específicos.....	17
4. Justificación.....	18
5. Antecedenes	20
6. Marco de Referencia	23
6.1. Marco Teórico.....	23
6.1.1. Panorama de la situación energética	23
6.1.2. Producción arroceras y porcícola en el departamento del Meta	24
6.1.3. Biomasa como fuente energética e implementación del proceso de digestión anaerobia.....	25
6.1.4. Características físico-químicas de los sustratos	28
6.1.5. Implementación del Biogás en Colombia y el departamento del Meta.....	29
6.2. Marco Legal	31
7. Metodología	34
7.1. Determinación de las características físico-químicas del co-sustrato cascarilla de arroz, excretas porcinas e inóculo	34
7.1.1. Determinación de: Humedad, sólidos totales, sólidos volátiles totales y pH.	34
7.1.2. Determinación de: Carbono, Nitrógeno y Azufre.....	36
7.2. Construcción y puesta en marcha del montaje experimental.....	38
7.2.1. Obtención de inóculo:	38
7.2.2. Construcción del montaje experimental a temperatura constante de 37° c, mesofílico.....	39
7.2.2.1 Determinación de las muestras de: Inóculo, excretas y co-sustrato.....	39

7.2.2.2 Montaje experimental para la determinación de biogás y metano producido	40
7.3. Análisis de resultados y graficas de curvas de producción de biogás y metano.....	41
7.3.1 Cálculo de volumen de Biogás obtenido	41
7.3.2 Cálculo de potencial del Biogás obtenido.....	42
8. Resultados y análisis	43
8.1. Caracterización de los sustratos (cascarilla de arroz y excretas) e inóculos.	43
8.1.1. Cascarilla de arroz.....	43
8.1.2. Excretas porcinas.....	45
8.1.3. Inóculos	47
8.2. Análisis de producción de biogás y metano.....	50
8.3. Determinación del potencial energético del co-sustrato cascarilla de arroz.	58
9. Discusión de resultados.....	62
Conclusiones	63
Recomendaciones	64
Bibliografía	65
Anexos	70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Características físico-químicas de la cascarilla de arroz	28
Tabla 2. Matriz normativa.....	31
Tabla 3. Métodos para la determinación de parámetros físico-químicos de los sustratos.....	34
Tabla 4. Métodos para la determinación de parámetros químicos de los sustratos	36
Tabla 5. Características de las soluciones de sustratos	37
Tabla 6. Concentraciones de las soluciones de sustratos	37
Tabla 7. Inóculos.....	38
Tabla 8. Determinación del número de muestras.....	39
Tabla 9. Características del montaje.	40
Tabla 10. Caracterización del co-sustrato cascarilla de arroz.....	43
Tabla 11. Comparación de características del sustrato Cascarilla de arroz	44
Tabla 12. Caracterización de excretas porcinas	45
Tabla 13. Caracterización de inóculos	47
Tabla 14 . Comparación de Inóculos de diferentes operaciones en condiciones mesofílicas.....	48
Tabla 15. pH inicial y final – corrida 1	51
Tabla 16. PH inicial y final – corrida 2.....	53
Tabla 17. PH inicial y final – corrida 3.....	55
Tabla 18. PH inicial y final – corrida 4.....	56
Tabla 19. Características finales del potencial energético de los sustratos.....	58
Tabla 20. Comparación de potencial energético de la Cascarilla de arroz.	60

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Pesaje de muestra por cuadruplicado de inóculo	35
Figura 2. Pesaje de muestra triplicada de cascarilla de arroz	35
Figura 3. Pesaje de muestra por triplicado de excretas porcinas obtenidas en Guacavía	35
Figura 4. Pesaje de muestra por triplicado de excretas porcinas obtenidas en la UNILLANOS	36
Figura 5. Preparación de soluciones para toma de muestras	37
Figura 6. Preparación de muestras para espectrofotometría	37
Figura 7. Muestras en termo reactor	38
Figura 8. Montaje experimental prueba piloto	41
Figura 9. Montaje final	41
Figura 10. Cerdos mixtos y corral de crianza – Universidad de los Llanos	46
Figura 11. Cerda lactante – Institución Educativa Agrícola Guacavía	46
Figura 12. Biodigestor Institución educativa Guacavía.....	49
Figura 13. Biodigestor Centro Agroecológico la Cosmopolitana,.....	50
Figura 14. Biodigestor USTA-Villavicencio,	50
Figura 15. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas– Corrida 1	51
Figura 16. Curvas de producción diaria(A) y diaria acumulativa (B)de biogás y metano, del co-sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 1	52
Figura 17. Curvas de producción diaria(A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas– Corrida 2	53
Figura 18. Curvas de producción diaria de biogás y metano (A) y diaria acumulativa de biogás (B), del co-sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 2	54
Figura 19. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas – Corrida 3	55
Figura 20. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del co-sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 3	55

Figura 21. Curvas de producción diaria(A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas – Corrida 4 57

Figura 22. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del co-sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 4 57

Lista de anexos

Pág.

Anexo A: Formulas y ejemplos de cálculo para la determinación de las características físico-químicas de los sustratos e inóculos. 70

Anexo B: Procedimiento para la obtención de las curvas patrón en la identificación de: (Carbono, Nitrógeno, Azufre) 71

Anexo C: El presente apartado, describe la normalización de los datos diarios y acumulativos obtenidos de la producción de biogás y metano, evidenciando las fórmulas utilizadas y la síntesis del potencial energético de los sustratos en función de los Solidos Volátiles correspondiente. .. 78

Anexo D: Datos de producción de biogás, metano, variables ambientales y mapa de puntos de muestreo..... 79

Resumen

La implementación de energías alternativas, son de gran importancia con respecto a la creciente generación de residuos del sector agropecuario en el departamento del Meta, en la búsqueda de la disminución de los impactos generados por los diversos sectores productivos del país. Es por ello que el presente estudio determino la factibilidad del uso de la cascarilla de arroz en co-digestión con excretas porcinas para la producción de biogás, aprovechando el potencial energético de este sustrato. Se determinó las características físico -químicas de la cascarilla de arroz como co-sustrato producido en la región del Meta, donde se obtuvo una proporción de 81,70% de ST , 79.80% de SV, datos con una desviación estándar de 3,4 - 4,4 respectivamente y disponibilidad de carbono consumible de 3.913,48mg/l, asociado a la naturaleza del sustrato, el cual contiene carbohidratos, proteínas y lípidos; lo anterior permitió considerar una noción inicial del potencial energético para realizar posteriormente un análisis a partir del volumen de Biogás;, y fue posible establecer que los factores de mayor influencia en este proceso fueron: pH, tiempo de digestión, calidad del inoculo, naturaleza del co-sustrato y altos niveles de nitrógeno.

La factibilidad de producción de biogás del sustrato en co-digestión, se realizó teniendo en cuenta los parámetros descritos en el APHA (Standard Methods) para fracciones sólidas. El proceso, mantuvo condiciones de temperatura mesofílica constante de 37°C, implementando el proceso de co-digestión anaerobia, por medio de un montaje experimental, usando 6 biodigestores, los cuales se analizaron en 4 corridas de 15 días cada una, variando en las mismas la cantidad de co-sustrato (cascarilla de arroz) analizada; previo a las corridas de análisis, se realizó una prueba piloto en la cual se identificó las características a modificar en los montajes posteriores. Se hizo seguimiento diario del volumen de Biogás obtenido en cada biodigestor, y así mismo se midió diariamente variables ambientales como temperatura, humedad relativa y presión. Lo anterior permitió establecer que el potencial energético del co-sustrato cascarilla de arroz con excretas porcinas óptimo fue de 20,81ml/grSV y un porcentaje de CH₄ promedio del 50,6%, siendo factible para la implementación de biodigestores rurales como método de energía alternativa y posible solución al déficit energético.

Palabras Clave: Biomasa, Codigestión Anaeróbica, Cascarilla de Arroz, Biogás, Potencial Energético.

Abstract

The implementation of alternative energies, are of great importance with respect to the growing generation of waste from the agricultural sector in the department of Meta. The use of this kind of wastes, generated by various productive sectors of the country, can impact positively in the environment. Due to that, the present study determined the feasibility of using rice husk in co-digestion with swine manure for the production of biogas, taking advantage of the energy potential of this substrate. A physical and chemical characterization of the rice husk (produced in the Meta Region) was achieved as first step of the investigation. This substrate was constituted with 81,70% ST and 79.80% SV, data with a standardized deviation of 3,4 – 4,4 respectively and consumable carbon availability of 3,913.48mg/l, associated with the nature of the substrate, which contains carbohydrates, proteins and lipids; This allowed us to consider an initial notion of the energy potential to subsequently carry out an analysis based on the volume of biogas, and it was possible to establish that the factors of greatest influence in this process were: pH, time of digestion and inoculum quality, nature of the co-substrate and high levels of nitrogen.

The feasibility of biogas production of the substrate in co-digestion was carried out taking into account the parameters described in the APHA (Standard Methods) for solid fractions. The process, maintained mesophilic temperature conditions, of 37°C, implementing the process of anaerobic co-digestion, by means of an experimental assembly, using 6 biodigesters, which were analyzed in 4 runs of 15 days each, varying in them the amount of co-substrate (rice husk) analyzed; prior to the runs of analysis, a pilot test was carried out in which the characteristics to be modified in the subsequent assemblies were identified. Daily monitoring of the volume of Biogas obtained in each biodigester was made, and environmental variables such as temperature, relative humidity and pressure were measured daily. The allowed establishing that the energy potential of the rice husk co-substrate with optimal pig excreta was 20,81ml/grSV and an average CH₄ percentage of 50,6% being feasible for the implementation of rural biodigesters as an alternative energy method and possible solution to the energy deficit.

Key Word: Biomass, anaerobic co-digestion, rice husk, biogas, energy potential.

Introducción

La dependencia a nivel mundial de los combustibles fósiles como fuente energética, junto con la creciente disminución de estos recursos y el impacto ambiental que se deriva de ellos; son algunas de las principales razones por las cuales hoy en día se impulsa el desarrollo y tecnificación de energías renovables, las cuales se basan en fuentes naturales, provocando un menor grado de impacto ambiental con respecto a las energías convencionales; lo anterior está siendo promovido mediante la implementación de planes, proyectos y políticas gubernamentales específicas de cada país con el fin único de hacer frente a las causas del cambio climático. Es por ello que, en Colombia, según la UPME para el año 2017 se registraron 1081 proyectos de energías renovables, teniendo mayor participación los relacionados con energía hidráulica y solar (MINMINAS, 2018); sin embargo, solo 24 proyectos implementaron la biomasa como fuente de energía alternativa. Es importante resaltar que Colombia cuenta con una amplia disposición de recurso como la biomasa, ya que uno de los ejes centrales de la economía se basa en la producción agropecuaria, de la cual se generan residuos (como por ejemplo cascarilla de arroz y excretas porcinas) aprovechables para la conversión energética; que generalmente son incinerados, llevados a rellenos sanitarios o dispuestos a la intemperie, ocasionando que estos sean responsables del 44.9% de los GEI producidos en el país según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2016).

Uno de los departamentos con mayor participación en la producción agropecuaria del país es el Meta; siendo una de las regiones con mayor potencial para la implementación de energía alternativa a partir de la biomasa residual (Nuñez, 2016). Para aprovechar el potencial energético de los residuos del mismo, uno de los métodos es la implementación de biodigestores, siendo esta una tecnología de fácil implementación en el sector rural; a partir de la cual el principal producto obtenido es el Biogás, el cual puede ser utilizado en esquemas de producción energética, reduciendo los impactos ambientales de la energía de tipo convencional.

El presente trabajo se fundamentó en la disponibilidad de residuos como la cascarilla de arroz y excretas porcinas del departamento del Meta, para la generación y potencialización energética no convencional.

1. Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del Problema

El sector energético comprende la explotación y producción energética, la cual se divide en un “93% de recursos primarios de origen fósil, aproximadamente un 4% de hidroenergía y un 3% de y residuos” (Arce, 2017), dicho sector es uno de los más importantes debido a que desempeña un papel significativo en los componentes sociales y económicos del país, además de esto “en el 2013 los impuestos, regalías y dividendos provenientes del sector energético constituyeron el 31% de los ingresos corrientes del Estado” (Nieves & Vidal, 2016); sin embargo, las fuentes de obtención energética (constituidas principalmente por la producción de recursos energéticos convencionales) tales como petróleo, carbón, gas natural y los procesos productivos como la minería, la agroindustria, la producción pecuaria, la industria manufacturera, entre otras, impactan considerablemente al ambiente, los recursos naturales y la sociedad, puesto que la producción de energía a partir de dichos recursos, genera vertimientos con trazas contaminantes, emisión de gases de efecto invernadero, modificación de las características físico-químicas del suelo, migración de especies, entre otros. Uno de los recursos energéticos más representativos es el petróleo, cuyo proceso de extracción genera gran impacto ambiental, considerándose el uso masivo de agua y la magnitud de desechos producidos de impacto ecológico diverso ya que contienen metales pesados, y algunos compuestos tóxicos como los hidrocarburos aromáticos, mercurio, entre otros (Ramos, 2011).

En torno a la problemática ambiental, uno de los temas que ha representado mayor preocupación, es el cambio climático; “se prevé que las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) se eleven en 50%, principalmente debido al incremento de 70% en las emisiones de CO₂ relacionadas con la generación de energía.” (OCDE, 2012). Las alteraciones anteriormente mencionadas, generan efectos perjudiciales a la salud humana, que generalmente se manifiestan por vía directa (exposición al estrés térmico, disminución de la calidad del aire e incidentes patológicos) y de manera indirecta (enfermedades transmitidas por insectos, por el agua, afectación

de las infraestructuras de salud pública, etc.) (Tortajada F, 2001) y en algunos casos impactos en la dinámica social.

Uno de los factores determinantes que posibilitan que continúe la explotación de los combustibles fósiles, es el poco desarrollo de conocimiento por parte de la sociedad acerca de las energías limpias o alternativas, lo es generado en mayor medida por la poca inversión de los entes gubernamentales para la promoción de investigación e implementación de dichas energías, reflejándose en la división presupuestal del gobierno, debido a que para el 2018 el presupuesto asignado para ciencia y tecnología fue de 222.000.000.000 (MINHACIENDA, 2018), siendo uno de los más bajos presupuestos del país.

Sin embargo, durante los últimos años se ha evidenciado mayor preocupación por la protección de los recursos naturales; es por ello que se han estudiado procesos de generación de energía proveniente de los recursos renovables; uno de ellos es la transformación energética a partir del aprovechamiento de los residuos del sector agrícola y porcícola; no obstante, en la actualidad se presentan limitantes para la implementación de dichas energías, este fenómeno está inmerso en la dependencia de la energía fósil por ideas relacionadas con la negación a otras formas de obtención energética. Lo anterior ha originado la base para indagar sobre escenarios futuros, como lo señala la (Comision Europea, 2012), las proyecciones para el período 2000-2030 indican que la demanda mundial de energía aumentará a un ritmo aproximado del 1,8% anual, lo cual se ve influenciado principalmente por el crecimiento poblacional y el desarrollo económico de la sociedad, lo que significa que el crecimiento será prolongado y la oferta deberá satisfacer la creciente demanda.

A nivel regional, el departamento del Meta, posee un alto potencial en la obtención de energías limpias como el Biogás, debido a que se caracteriza por su vocación agrícola, generando grandes volúmenes de residuos que pueden ser usados como materias primas, para el aprovechamiento de su potencial energético, sin embargo, la gran cantidad de residuos que son generados en las cosechas de cultivos, la crianza de ganado y su inadecuada disposición final, son algunas de las principales fuentes con mayor incidencia en la calidad del medio ambiente (Velasquez, 2013).

1.2. Formulación entorno al problema

De la producción de biogás a partir de la co-digestión anaerobia del co-sustrato cascarilla de arroz con excretas porcinas ¿Cuál es el potencial energético obtenido, para la implementación como fuente de energía alternativa?

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Determinar el potencial energético para la producción de Biogás, a partir de la co-digestión anaerobia del co-sustrato cascarilla de arroz con excretas porcinas.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las características físico-químicas del co-sustrato cascarilla de arroz y excretas porcinas.
- Analizar la producción de Biogás, a partir de la interpretación de curvas de producción (Biogás producido y % CH₄).
- Establecer el potencial energético de la cascarilla de arroz en co-digestión con excretas porcinas, para el aprovechamiento del mismo como fuente energética alternativa.

3. Justificación

Los procesos convencionales para la obtención energética, junto con los sectores productivos y las distintas actividades de la sociedad, han generado problemáticas de carácter ambiental; como por ejemplo el cambio climático, siendo este de los más representativos asociados a la obtención energética actual; éste fenómeno ha propiciado que se orienten los procesos productivos y las actividades realizadas por el hombre hacia un enfoque ambiental de producción limpia, haciendo uso de materiales, subproductos y residuos generados en dichas actividades, en la búsqueda del mejoramiento de las cadenas productivas y la disminución de los efectos negativos al ambiente.

Lo anterior fundamenta la base de investigaciones en materia ambiental, integrando componentes sociales, económicos, políticos y culturales, con el fin de mitigar los impactos generados y diseñar propuestas que reemplacen los modelos convencionales de producción energética, como las que se obtienen mediante energías renovables, las cuales al basarse en componentes naturales, pueden perdurar significativamente en el tiempo, permitiendo satisfacer la demanda energética actual y futura de manera sostenible (Fuente, Autores).

En consecuencia de lo anterior, la ONU aprobó en 2015 los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) proyectados a 2030; con el objetivo de hacer frente a la problemática asociada a la energía (ONU , 2016); estos objetivos abarcan temáticas como investigación y avances tecnológicos enfocados a la implementación de energías renovables; así mismo a nivel Colombia se han adoptado estrategias asociadas a contrarrestar la problemática de cambio climático como por ejemplo, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, evocando la necesidad de aumentar el uso de energías renovables. En ese sentido, es importante implementar mecanismos de generación energética, que aprovechen subproductos (y/o residuos) resultantes de otros procesos, que generalmente son considerados desechos sin valor económico, y que sean la base estratégica de los planes de desarrollo mundial; tal es el caso de la biomasa, además de considerarse como una energía renovable abundante a nivel mundial, es una fuente energética que puede funcionar en diferentes mercados energéticos, debido a que permite producir energía en forma de calor, eléctrica y biocarburantes líquidos, así mismo es más económica de producir y genera múltiples

beneficios ambientales si se desarrolla de forma sostenible (Peña, 2016). Uno de los principales productos obtenidos de la conversión energética de la biomasa, a partir de la implementación de biodigestores, es el Biogás, éste como fuente de energía renovable, ha generado un gran interés en los últimos años, siendo una de las tecnologías de más fácil implementación, especialmente en sectores rurales (Varnero, 2011). Es por ello que la conversión energética de los sustratos que se utilizaron para determinar el potencial energético de los mismos en el presente estudio, apuntan a la obtención de Biogás como elemento principal en el análisis de la variabilidad energética de los residuos (sustratos).

Considerando que el Departamento del Meta, es uno de los principales productores arroceros y porcícolas a nivel Colombia, con gran participación económica en la región y con ello la disponibilidad de residuos tales como la cascarilla de arroz y estiércol porcino. Lo anterior se evidencia en el último censo arrocero del periodo 2016-2017 sobre arroz mecanizado, “los llanos orientales cuentan con una participación del 48.9%, a nivel Colombia, destacándose el departamento del Meta con una producción semestral en el primer periodo de 2017 de 989.959 toneladas/semestre, generando aproximadamente 197.991.888 toneladas/semestre de cascarilla” (DANE, 2016), así mismo, datos proporcionados por el último censo porcino 2017 “el número de animales ascendió 223.237 de lo cual un porcino de aproximadamente 50kg produce 2,25kg/día de excretas” (ICA, 2017); lo anteriores de significativa importancia, para el uso en la producción energética del departamento.

Uno de los factores que impulsó el presente trabajo, fue reconocer la importancia del aprovechamiento de estos residuos, de tal manera que sea posible implementar biodigestores, con el objetivo de ser una posible alternativa energética para poblaciones rurales que por condiciones sociales y geográficas no cuentan con fuentes energéticas o no tienen acceso a ellas. Tal es el caso asociado con las poblaciones rurales del departamento del Meta donde, según la (UPME, 2014) hacia el año 2015, alrededor de 18.000 viviendas del sector rural no contaban con acceso a energía eléctrica, según el ICEE, propuesto como indicador del Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica. Es por esto que el presente trabajo de investigación, buscó determinar la factibilidad de la implementación del co-sustrato cascarilla de arroz para la producción de Biogás, como una fuente alternativa de energía limpia.

4. Antecedentes

A nivel internacional se evidencian importantes iniciativas con respecto al uso de los residuos de arroz, principalmente la cascarilla de arroz en procesos de incineración, en la industria de construcción como material de mezcla para la elaboración de asfalto vial, y entre otros en el transporte de animales; sin embargo, durante los últimos años se ha orientado el uso de estos residuos para la producción energética.

- Cascarilla de arroz

En Malasia hacia el año 2012, se desarrolló una revisión bibliográfica acerca de la utilización de cascarilla de arroz, para la generación de energía renovable; según la publicación la producción arrocera es una de las más importantes a nivel mundial y de las que más generan residuos aprovechables; la cantidad anual a nivel mundial de cascarilla de arroz es de 137 millones de toneladas, de la cual América aporta 12,52 millones de toneladas anuales (Lim Shiun, Manan Abdul, Alei Wan, & Hashim, 2012).

Así mismo, en Cuba para el año 2013, se realizó un estudio sobre la digestión anaerobia de la cascarilla de arroz para producción de biogás. La metodología utilizada, abarcó la caracterización del sustrato cascarilla de arroz y el análisis gráfico de la obtención del Biogás. El montaje se realizó con reactores a escala laboratorio en condiciones mesofílicas y termofílicas. Como resultado, la cascarilla de arroz obtuvo producción en el caso mesofílico de $0,073\text{m}^3/\text{kg SV}$ de biogás y en el caso termófilo de $0,08\text{m}^3/\text{kgSV}$ de biogás (Velasquez, 2013).

En 2016, en Uganda, se realizó un estudio con el fin de comparar las propiedades de 10 variedades de cascarilla de arroz cultivadas en el país, en el que se evaluó las características físico-químicas como: densidad, humedad, material volátil, lignina entre otros; como resultado se obtuvo que debido a las propiedades de la cascarilla de arroz es factible utilizarla en un sistema generador de gasificación y representa menos costos de producción que una planta Diésel (Olupot P & Walozi, 2016).

- Excretas porcinas

En la provincia de Ebonyi, Nigeria hacia el año 2013, se realizó una investigación para la obtención de Biogás a escala de laboratorio; se utilizó rumen de vaca como inóculo para la producción; dentro de la investigación, se determinó que la relación de inóculo y materia prima que mayor porcentaje de Biogás producía era de 1:6 p/v y pH inicial 7 con un rendimiento de biogás de 382ml/día. Dentro de la investigación, se evaluaron factores como el agua dilución, pH inicial, metales pesados y las fuentes de nitrógeno (Okeh, Onwosi, & Odibo C, 2013).

En China, hacia 2014, se realizó un estudio en el que se evaluó las características de digestión anaerobia en condiciones mesofílicas de excretas porcinas en diferentes etapas de crecimiento, como: (Cerdas gestantes, lechones destetados, cerdos de engorde y mixtos); concluyendo que la mayor producción de metano se da con excretas de cerdos mixtos (Zhang Wanqin & Wu, 2014).

Así mismo, en China para el año 2018, se estudió el proceso de digestión anaerobia para excretas porcinas con pre tratamiento térmico para la obtención de sustrato seco, evaluando su viabilidad en un experimento semicontinuo; en el que se obtuvo una producción de metano de 314,6mlCH₄/grSV, en un tiempo de retención de 41 días, sin embargo, es una producción pobre con respecto a la digestión anaerobia húmeda (Hu Yu-ying, Li, & Poncin, 2018).

- Mezcla de sustratos

Además, en Italia hacia el año 2016, se estudió el rendimiento del proceso de co-digestión anaerobia para producir biogás, a partir de estiércol y biomasa lignocelulosa. Se determinó el potencial de metano del estiércol de cerdo (363 ± 22 ml de CH₄/grSV). Además, el pasto ensillado mecánicamente pre tratado logró una producción de metano significativamente mayor (353 ± 19 ml CH₄/grSV) en comparación con las muestras no tratadas (314 ± 53 ml CH₄ /grSV). (Vitali, Parmigiani, Vccari, & Collivignarelli, 2016).

En el año de 2017, en Irán, se evaluó el proceso de co-digestión anaerobia, de estiércol animal y residuos lignocelulósicos, mediante una revisión bibliográfica. Se determinó que el estiércol

animal posee una baja relación de C/N, es por ello que se utiliza residuos de biomasa lignocelulósica que permiten compensar la deficiencia de carbono en el estiércol (A.Neshat, Mohammadi, D.Najafpour, & Lahijani, 2017).

Colombia, se ha sumado a la implementación de energías alternativas, así como también en el aprovechamiento de residuos. Se ha adelantado en materia de leyes, diferentes normativas que lo promueven, y proyectos como PROURE, cuyo objetivo es “promover el Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, asegurando el abastecimiento energético, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el ambiente y los recursos naturales”. (Bochno Hernández, 2011).

Para el año 2016, en la ciudad de Bogotá, la Universidad Militar Nueva Granada, desarrolló un proyecto de investigación, con el fin de determinar la factibilidad para producir biogás por la descomposición anaerobia de materia orgánica y lixiviada en el relleno sanitario Doña Juana. Dicho proyecto, se orientó al aprovechamiento del biogás obtenido para la generación de energía eléctrica y térmica. El relleno Sanitario Doña Juana, tiene una capacidad para tratamiento de biogás de 15000 m³/hr (Borda, 2016).

En el departamento del Meta, para el año 2018, se realizó un estudio denominado “Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la Institución Educativa Agrícola Guacavía, Cumaral-Meta. Tesis de Grados. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia”; en el cual se determinó que la proporción en peso de excretas/agua con mejor remoción de material orgánico fue de 1:7, dato que se implementó en el montaje experimental de la presente investigación, asegurando la homogeneidad en la mezcla de sustratos.

5. Marco de Referencia

5.1. Marco Teórico

5.1.1. *Panorama de la situación energética*

La necesidad de transformar los procesos de obtención energética convencional a nivel global, es uno de los temas más importantes en la búsqueda de la disminución del impacto ambiental y degradación de los recursos, aumentando significativamente el uso de las energías renovables en todos los escenarios actuales relacionados con el desarrollo social, económico, cultural e incluso político. De esta manera es importante reconocer que las decisiones que se tomen a nivel global frente a cómo se obtiene la energía y como se llevan a cabo las actividades humanas productivas determinan la situación energética mundial en un futuro próximo.

No obstante, y pese al aumento de la implementación de las energías renovables en la actualidad, la principal fuente energética y de consumo siguen siendo los combustibles fósiles, principalmente el petróleo; “actualmente la matriz energética mundial se compone de un 33% petrolífera, 24,1% gas, 28.1% carbón, 6,9% hidráulica, 4,5 nuclear y apenas un 3,2% de energías renovables, pese a lo cual no se evidencia a ciencia cierta qué porcentaje corresponde a la implementación de la biomasa” (Revista BP, 2017). Escenarios futuros asociados al consumo energético mencionan un aumento del “15% en la implementación de energías renovables hacia el 2035, y pese a la disminución en los precios del crudo, la producción energética asociada al mismo registra una caída hacia 2035 en un 20% de lo registrado en 1995” (BP Energy Outlook , 2017).

En Colombia, la preocupación por la disminución de los impactos ambientales, la adaptación al cambio climático y la necesidad de asegurar suministro energético a nivel nacional; han generado que se diversifiquen los sistemas energéticos, implementando tecnologías más limpias y el aprovechamiento de subproductos y residuos de origen agrícola e industrial. (Vargas C, Andrade G, Neslin, & Zamora, 2017)menciona, que en la actualidad, Colombia cuenta con una de las matrices energéticas más limpias del mundo, ya que el 67% de la energía que se genera en el país

es proveniente de fuentes hídricas; sin embargo el nivel de consumo total de energía depende significativamente de las fuentes convencionales (petróleo y gas principalmente); es por ello que se hace necesario la inclusión de energías alternativas que aprovechen la riqueza agrícola del país, entre otros, teniendo en cuenta que actualmente solo se cuenta con un 2,5% de energías renovables pertenecientes a: biomasa, solar y eólica.

Escenarios futuros, específicamente orientados a 2030, visualizan a Colombia en contextos energéticos donde la oferta de energía renovable se incrementa y se reduce la sensibilidad en el consumo de energía (UPME, 2017).

5.1.2. Producción arrocerá y porcícola en el departamento del Meta

El departamento del Meta se caracteriza por la eficiente producción en el sector agroindustrial, por lo cual el mercado y la oferta dentro del mismo, se encuentra potencializada frente a la producción del sector ganadero y el sector agrícola en los productos de la región, los cuales han adquirido una importancia significativa en el departamento. Por un lado el sector arrocerá se divide en cinco regiones del país (Bajo Cuaca, Centro, Costa Norte, Llanos, Santander), la región de los llanos orientales cuenta con 258.292 ha cultivadas, con una participación en producción anual del 45,8%, de la cual el 13,5% de dicha participación corresponde a la producción del departamento del Meta con una distribución de área cosechada del 14,9%, según datos tomados del censo nacional arrocerá (DANE, 2016). Teniendo en cuenta lo anterior, el sector arrocerá produce grandes volúmenes de residuos, que para el año 2016 se registraron 901,466 toneladas/año, frente a las 353.616 toneladas/año de producción de arroz estimadas para el mismo año (Nuñez, 2016).

La crianza de cabezas de cerdo o sector porcícola tiene gran importancia en el país puesto que Colombia cuenta con una población porcina de 5.327.460 animales, que se distribuyen en 234.883 predios, de los cuales el departamento del Meta representa el 4,19% de los mismos, con un total de 223,237 porcinos registrados en el año 2017 y un total de predios porcinos de 4.702 registrados durante el mismo año, además de esto, se registró una producción de excretas porcinas de 135.657 toneladas/año; según el censo porcino colombiano desarrollado por el (ICA, 2017). Es importante tener en cuenta que la especie porcina es de las más eficientes en relación a la conversión

alimenticia, lo que infiere en la baja producción de excretas con respecto a la producción cárnica; las excretas producidas por dicha especie en los corrales o granjas de crianza se conocen como porcinaza, la cual está formada por heces fecales y orina mezcladas con el material utilizado como cama, residuos de alimento junto con otras partículas y agua proveniente de labores de lavado (UNAL, 2016). Además de la baja relación de producción de estiércol, se pueden involucrar diversos factores que inciden en dicho proceso, entre los cuales se puede señalar: edad del animal, madurez fisiológica, cantidad y calidad de alimento ingerido, volumen de agua consumida, clima (Quintana, 2016).

5.1.3. Biomasa como fuente energética e implementación del proceso de digestión anaerobia.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. “Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m , y presencia de CO_2 , CO e H_2) son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa, este depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad” (Coordinación de Energías Renovables, 2008). El contenido energético de la biomasa suele medirse en términos del poder calorífico del recurso. El poder calorífico de un combustible se relaciona con la cantidad de calorías que puede producir por la combustión de una unidad de masa, de manera que no solamente la biomasa, sino cada combustible posee un valor con el que se puede comparar con otros de características similares (García R, 2001), Estas características propias de la energía almacenada en forma de biomasa, determinan los procesos mediante los cuales se realizará la conversión de la misma para la obtención energética.

“La biomasa seca se puede obtener en forma natural con un grado de humedad menor al 60%, como la leña, paja, etc. Siendo apta energéticamente para ser usada en procesos termoquímicos o fisicoquímicos, que producen directamente energía térmica o subproductos en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Mientras que la biomasa húmeda, se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los restantes vegetales, residuos animales, entre otros. Lo que la hace especialmente adecuada para su tratamiento mediante procesos químicos, o en algunos casos particulares, simples procesos físicos, obteniendo

combustibles líquidos y gaseosos”. (Coordinación de Energías Renovables, 2008). En cuanto a los procesos térmicos, “esta tecnología se utiliza en casos en los que la biomasa, por su estado básicamente sólido y seco, permite para su transformación en energía altas velocidades de reacción. En estos procesos se obtienen conversiones normalmente elevadas de la materia prima del 85 al 95% de su materia orgánica con alta eficacia y relativa poca sensibilidad al variar de un material a otro; y además se pueden dirigir hacia los productos más convenientes” (Migués Tábares J, 2018).

Sin embargo, uno de los procesos para la conversión energética de la mezcla de sustratos húmedos (evaluados en la presente investigación), es la digestión anaerobia, realizándose una conversión de biomasa como de los procesos bioquímicos naturales que se basan en la degradación de la biomasa por la actividad microbiana, y se dividen en dos grandes grupos: los que se producen en ausencia de oxígeno (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de oxígeno (aeróbicos) (Coordinación de Energías Renovables, 2008).

Durante el proceso anaerobio se convierte la materia orgánica, en ausencia de oxígeno molecular como aceptor de electrones, en una mezcla de gases (Biogás) y un efluente estabilizado o lodo con propiedades biofertilizantes. “El Biogás está formado principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas proporciones de otros gases como H_2 , H_2S , NH_3 , N_2 y vapor de agua” (Velasquez, 2013). Este proceso que se lleva a cabo en biodigestores y/o biorreactores, abarcando una serie de fases determinadas por diferentes variables que se monitorean durante todo el proceso de co-digestión, lo que influye en la obtención del producto como lo es el Biogás. El proceso de degradación anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas.

- **Hidrólisis o licuefacción:** En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.

- **Acidogénesis:** En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente.
- **Acetogénesis:** Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO₂.
- **Metanogénesis:** En esta etapa metabólica el CH₄ es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H₂ y CO₂, pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol. El rol de las bacterias metanogénicas se define por el tipo de sustrato disponible” (ICIDCA, 2012).

No obstante, la efectividad de realización de las etapas anteriormente mencionadas, están sujetas al mantenimiento, monitoreo y seguimiento de variables ambientales y operaciones dentro de los biodigestores; esto mediante el control de parámetros ambientales en el proceso de digestión.

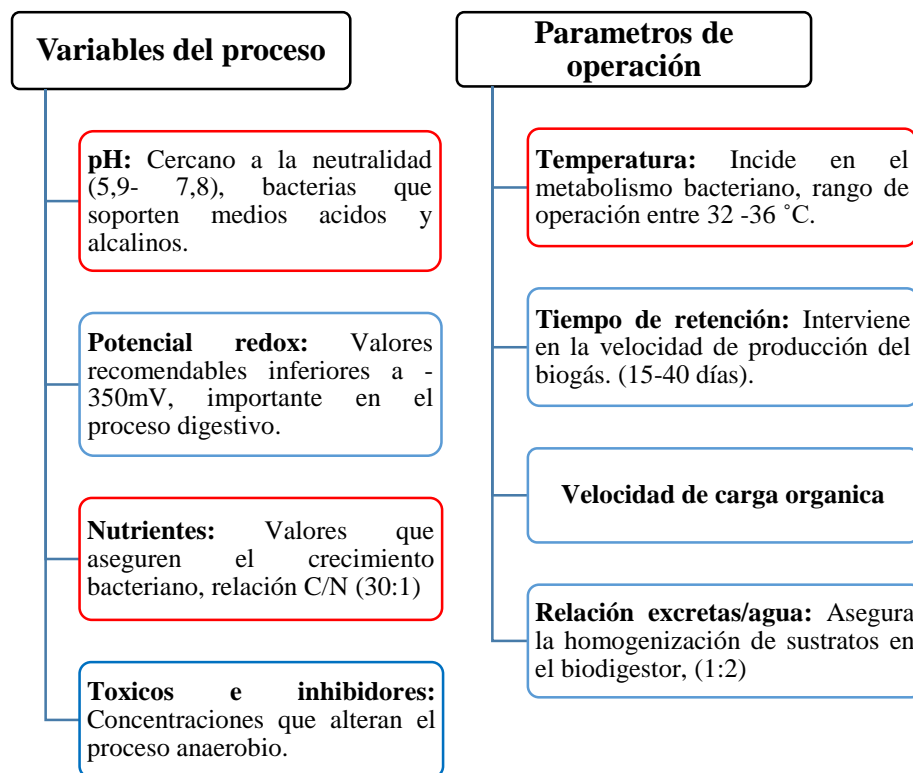


Ilustración 1. Diagrama de síntesis de variables y parámetros de control adaptado de (Americarum Universitas, 2013), (García A, 2016) por Gutiérrez & Ochoa 2019.

El seguimiento de los parámetros y variables anteriormente descritas, determinan la calidad del producto obtenido, en este caso Biogás.

5.1.4. Características físico-químicas de los sustratos

La producción de Biogás a partir de sustratos de origen natural, está directamente relacionada con las características químicas de dichos sustratos, por lo cual para la presente investigación es importante reconocer de manera individual las características de cada sustrato, para de esa manera establecer hipótesis de producción.

- **Cascarilla de arroz.**

La producción arrocera, enmarcada de manera significativa en cinco regiones del país, representa una alta producción en el mismo, por tal motivo cuenta con una amplia disposición de los residuos de dicha industria, tales como la cascarilla de arroz, la cual posee características físicas y químicas descritas a continuación:

Tabla 1. Características físico-químicas de la cascarilla de arroz

COMPONENTE	%
Carbono	39,1
Hidrógeno	5,2
Nitrógeno	0,6
Oxígeno	37,2
Azufre	0,1
Cenizas	17,8

Nota. Características físico-químicas teóricas, para el co-sustrato Cascarilla de arroz adaptado de (Varon, 2005) por Gutiérrez & Ochoa 2019.

“La cascarilla de arroz es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo a la púrpura oscura. Su densidad es baja, por lo cual al apilarse ocupa grandes espacios. El peso específico es de 125 kg/ m³, es decir, 1 tonelada ocupa un espacio de 8 m³ a granel” (Varon, 2005)

- **Excretas porcinas.**

La crianza de cerdos en Colombia, está destinada en mayor medida para la producción de proteína cárnica y es uno de los alimentos principales del país, es por ello que, a raíz de la creciente demanda alimentaria, ha aumentado la crianza de cerdos y con ello la generación de residuos o subproductos tales como la porcina; la cual presenta ciertas características que permiten su degradabilidad y la producción de abono, Biogás, entre otros. Dichas características se ven influenciadas por factores como la alimentación de los cerdos, el clima, el peso, etc. “La densidad de la excreta fresca es ligeramente menor de 1,0 (aunque son comunes las referencias de valores ligeramente superiores a 1.0). El total de los sólidos tiene una densidad baja, de 0,84 kg/l. La excreta porcina contiene sólidos que flotan y sólidos que se sedimentan, además de sólidos en suspensión. Los Sólidos Volátiles Totales constituyen el 80% de los STT y cerca del 10% de las heces y orina excretadas por día.” (Quintana, 2016)

Es importante tener en cuenta las características químicas de las excretas porcinas, que propician a las condiciones de degradabilidad y están dadas por la presencia de nutrientes en las mismas, “En las excretas, el Nitrógeno Total (TKN) se compone principalmente de nitrógeno orgánico y de amoníaco (TAN). Del nitrógeno total producido, el 60% está en forma amoniacal (TAN) y el 40% en forma orgánica (TON). La gran mayoría del nitrógeno de las heces fecales orgánico, mientras que la totalidad del de la orina es amoniacal. Por acción de las bacterias aeróbicas de los suelos, el nitrógeno orgánico es transformado en nitrógeno amoniacal. Así mismo, el nitrógeno amoniacal es llevado a nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) por la acción bacteriana en el suelo” (Cornare & Corantioquia, 2003)

5.1.5. Implementación del Biogás en Colombia y el departamento del Meta

La implementación de energías alternativas en Colombia, ha representado una transición significativa, la cual ha estado acompañada de diversos proyectos para la puesta en marcha de fuentes no convencionales de energía, legislación ambiental, y la creciente preocupación por la preservación y estado de conservación del panorama ambiental y sanitario del país, sin embargo, dicha transición ha sido tardía en cuanto a la escala temporal respecto a otros países y se debe a

factores como la escasa investigación, bajos porcentajes de inversión en proyectos de energías alternativas, entre otros. El Biogás puede ser utilizado en diferentes aplicaciones que abarcan, usos domésticos, comunitarios e industriales. A nivel doméstico, es posible implementar biodigestores, para aplicaciones de cocción, calefacción e iluminación, como también autoabastecimiento en zonas rurales o aisladas en las cuales se generan grandes cantidades de residuos orgánicos (Surendra, Andrew, Samir, & Khanal, 2015).

En Colombia se han desarrollado diferentes estudios de factibilidad y estimación del potencial de conversión energética que han permitido ampliar el panorama experimental para la puesta en marcha de proyectos para la producción de Biogás; *“El uso de biodigestores domésticos en Colombia a escala rural se ha venido desarrollando lentamente, dado el escaso apoyo institucional que se ha dado a este tipo de proyectos. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología en zonas andinas y algunas demostraciones a nivel doméstico han fomentado el crecimiento del sector en los últimos años. No se dispone de un registro completo de las pequeñas instalaciones disponibles a nivel rural, debido, principalmente, a que la mayor parte de las mismas son consecuencia de la iniciativa de los usuarios sin contar con un apoyo externo”* (Pabuena M & Pasqualino J, 2014)

El departamento del Meta, se caracteriza por las actividades económicas que desarrolla, en las que se destacan la agricultura, el comercio, el turismo, entre otros; sin embargo, la mayoría de dichas actividades involucran impactos en el componente ambiental, para lo cual instituciones educativas y corporaciones ambientales, han implementado proyectos investigativos que permitan orientar los procesos productivos al cuidado del componente ambiental. El departamento no cuenta con una base de datos establecida de los proyectos más sobresalientes de carácter ambiental cuyo enfoque sea la producción de Biogás. Es importante destacar que dentro del estudio denominado *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento* (TECSOL & UNAL, 2018), el departamento posee un amplio potencial para la producción de Biogás a partir del aprovechamiento de los residuos generados en las actividades económicas del sector agrícola y pecuario.

5.2. Marco Legal

La implementación de procesos alternativos para la obtención de energía, involucra normatividad que regula los procesos de conversión energética y se encarga principalmente de velar por la protección y conservación del entorno natural del país, promoviendo el uso sostenible de los recursos renovables del mismo.

Con lo anterior la normatividad presentada se orienta a dar cumplimiento a las obligaciones establecidas en cumbres y acuerdos internacionales a fines con el componente ambiental; es importante tener en cuenta que Colombia no cuenta con normatividad específica para el proceso de digestión anaerobia, por lo cual se relacionan la normatividad de energías renovables y la implementación de las mismas en la matriz energética del país.

Tabla 2. Matriz normativa

NORMA	ENTE EMISOR	DESCRIPCIÓN DE LA NORMA
		Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
LEY 99 DE 1993	Congreso de Colombia	Art 5.-33 Promover, en coordinación con las entidades competentes y afines, la realización de programas de sustitución de los recursos naturales no renovables, para el desarrollo de tecnologías de generación de energía no contaminantes ni degradantes.
LEY 629 DE 2000	Congreso de Colombia	Por medio de la 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. El objetivo de este Protocolo era reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), por lo cual las energías renovables se convirtieron en una opción estratégica para Colombia.

Tabla 1. (Continuación)

LEY 697 DE 2001	Congreso de Colombia	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.
LEY 1715 DE 2014	Congreso de Colombia	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.
RESOLUCIÓN 41286 DE 2016	Ministerio de Minas y Energía	Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2017-2022 para el desarrollo del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía, PROURE, que define objetivos y metas indicativas de eficiencia energética, acciones y medidas sectoriales y estrategias base para el cumplimiento de metas y se adopten otras disposiciones al respecto.
CONPES 3510 DE 2008	Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia Departamento Nacional de Planeación	Establece los lineamientos para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia, aprovechando las oportunidades de desarrollo económico y social que ofrecen los mercados emergentes de los biocombustibles. Por medio de esta ley se busca expandir los cultivos de biomasa conocidas en el país y diversificar la canasta energética dentro de un marco de producción económica, social y ambientalmente sostenible.
CONPES 3874 DE 2016	Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia Departamento Nacional de Planeación	Establece los lineamientos para la implementación de la Política Nacional para la gestión integral de residuos sólidos.

Tabla 1. (Continuación).

END 49 DE 2009	Guía de sostenibilidad de la cadena de los biocombustibles en Colombia. Parte 1: producción y procesamiento de biomasa y establece los principios, criterios y recomendaciones de sostenibilidad ambientales, sociales y económicos que se deberían cumplir en las etapas de producción y procesamiento de biomasa de la cadena de biocombustibles.
-----------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Nota. Recopilación de normatividad relacionada con el proceso de producción de Biogás Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

6. Metodología

6.1. Determinación de las características físico-químicas del co-sustrato cascarilla de arroz, excretas porcinas e inóculo

Para la determinación de las características físico-químicas de los sustratos e inóculo, se realizó una subdivisión relacionada con los métodos empleados tanto para los componente físicos como los químicos; así mismo y para unificar la diversidad de sustratos, se caracterizaron dos muestras de excretas porcinas obtenidas de la granjas de crianza de la Universidad de los Llanos, Villavicencio y dela Institución Educativa Agrícola Guacavía en el municipio de Cumaral, Meta; un tipo de cascarilla de arroz del proceso de producción arroceras mecanizada obtenida del Molino Arroz Roa y para finalizar los inóculos descritos en la Tabla 7.

7.1.1. Determinación de: Humedad, sólidos totales, sólidos volátiles totales y pH.

Siguiendo el procedimiento especificado para mediciones en residuos sólidos del Manual de Métodos Estandarizados o Standard Methods, se procedió a determinar las características de humedad, sólidos totales, sólidos volátiles totales y pH en los sustratos cascarilla de arroz, las dos muestras de excretas porcinas recolectadas y los inóculos. El procedimiento se llevó a cabo en 3 prácticas de laboratorio por cuadruplicado, lo anterior siguiendo lo establecido en la Tabla 3.

Tabla 3. Métodos para la determinación de parámetros físico-químicos de los sustratos.

Parámetro	Método	No. Standard Methods	Materiales	Equipos	Duración de la medición
Humedad	Gravimétrico	2540-B.	Cápsulas de porcelana, espátula	Horno, balanza analítica	24 horas
Sólidos totales	Gravimétrico	2540-B.	Cápsulas de porcelana, espátula	Mufla, balanza analítica	24 horas

Tabla 3. (Continuación).

Sólidos volátiles totales	Gravimétrico	2540-G	Cápsulas de porcelana, espátula	Mufla, balanza analítica	4 horas
pH	Electrométrico	4500-B	-	Medidor de pH	2 horas

Nota. Descripción de las características de los métodos implementados para la determinación de parámetros físico-químicos de los sustratos. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.



Figura 1. Pesaje de muestra por cuadruplicado de inóculo. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.



Figura 2. Pesaje de muestra triplicada de cascarilla de arroz. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.



Figura 3. Pesaje de muestra por triplicado de excretas porcinas obtenidas en Guacavía. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.



Figura 4. Pesaje de muestra por triplicado de excretas porcinas obtenidas en la UNILLANOS. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

7.1.2. Determinación de: Carbono, Nitrógeno y Azufre

Para la identificación de los componentes anteriormente mencionados, se realizó un análisis *ex situ* mediante el proceso de espectrofotometría, como un método de análisis químico de absorción de energía radiante, lo anterior se evidencia en la Tabla 4.

Tabla 4. Métodos para la determinación de parámetros químicos de los sustratos

Parámetro	Método	No. Standard	Materiales	Equipos
Methods				
DQO			Matraz aforado,	
Nitrógeno			tubos de ensayo,	Termoreactor,
Azufre	Espectrofotometría	(5220-D)	pipeteadores,	Espectrofotómetro
Fósforo			pipetas volumétricas,	
Hidrógeno	Electrométrico	(4500-B)	Medidor de pH	Multiparámetro

Nota. Descripción de las características de los métodos implementados para la determinación de parámetros químicos de los sustratos. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Previo a la determinación de los componentes, se prepararon las correspondientes soluciones para llevar a cabo la medición en el espectrofotómetro; para ello se tuvo en cuenta las características presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de las soluciones de sustratos

Cascarilla	Inóculo	Excretas
10 gr/1 lt Agua	-	1 kg/7 lt Agua

Nota. Relaciones de solución de los sustratos, usadas para el montaje experimental. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

De las anteriores soluciones, se prepararon diluciones con respecto a las concentraciones de los reactivos, las cuales se evidencian en la Figura 5 y se sintetizan las concentraciones en la Tabla 6.

Tabla 6. Concentraciones de las soluciones de sustratos

Cascarilla	Inóculo	Excretas
10 ml de solución / 1 lt Agua	10 ml de inóculo / 1 lt Agua	10 ml de solución / 1 lt Agua

Nota. Relaciones de dilución de los sustratos, usadas para el montaje experimental. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Con lo anterior, y siguiendo lo especificado en el Manual de Métodos Normalizados y la Guía del IDEAM - TP0086 (Rodríguez, 2007), para determinación de DQO, se determinaron los componentes correspondientes.

**Figura 5. Preparación de soluciones para toma de muestras.** Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.**Figura 6. Preparación de muestras para espectrofotometría.** Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.



Figura 7. Muestras en termo reactor. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

7.2. Construcción y puesta en marcha del montaje experimental

7.2.1. Obtención de inóculo:

La suspensión de microorganismos vivos (inóculo), para la puesta en marcha del montaje experimental; se obtuvo de 3 reactores anaerobios, descritos a continuación:

Tabla 7. Inóculos

CARACTERÍSTICAS	INOCULO 1	INOCULO 2	INOCULO 3
ORIGEN	Reactor anaerobio del proyecto: “Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la Institución Educativa Agrícola Guacavía, Cumaral-Meta”.	Reactor anaerobio: Proyecto de aula, catedra de Tratamiento de Aguas Residuales	Reactor anaerobio: Centro Agroecológico La Cosmopolitana.
UBICACIÓN	Institución Educativa Agrícola Cumaral-Meta	Universidad Santo Tomás Villavicencio, sede Aguas Claras	Municipio de Restrepo, Meta.

Nota. Características de los inóculos y descripción de su origen Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

7.2.2. Construcción del montaje experimental a temperatura constante de 37°C, mesofílico.

7.2.2.1 Determinación de las muestras de: Inóculo, excretas y co-sustrato

Para la definición de las muestras específicas del montaje experimental, se tuvo en cuenta el estudio denominado “Stirring and biomass starter influences the anaerobic digestion of different substrates for biogas production” (Rojas, Fang, & Uhlent, 2010) el cual permitió definir las proporciones que se utilizaron para el experimento que se evidencian en la Tabla 8, teniendo en cuenta el total de corridas realizadas con el montaje experimental. Para asegurar la obtención de la fase gaseosa en los recipientes implementados como fermentadores, se garantizó un espacio ocupado por la combinación de excretas porcinas, gramos de co-sustrato e inóculo del 57%.

Tabla 8. Determinación del número de muestras.

No. de corridas experimentales	Cascarilla de arroz	Inóculo	Solución de excretas porcinas
1	1,0 gr		
2	1,5 gr		
3	2,5 gr	200 ml	200 ml
4	2,0 gr		

Nota. Descripción del número de muestras y proporción de sustratos para el montaje experimental. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Para la preparación de la solución de excretas porcinas, se tuvo en cuenta la relación obtenida en la Tesis de Grado: “Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la Institución Educativa Agrícola Guacavía, Cumaral-Meta”, donde se identificó que la proporción en peso de Excretas/Agua con mejor remoción fue la de 1:7; por lo cual se aseguró una homogeneización de sustratos en cada biodigestor.

7.2.2.2 Montaje experimental para la determinación de biogás y metano producido

El montaje experimental, se realizó teniendo en cuenta el principio de funcionamiento de los reactores tipo Batch, sin agitación y con una única carga de alimentación presentada en la Tabla 9, donde se evidencia cada uno de los biodigestores con las diferentes proporciones de sustratos. Durante el tiempo de monitoreo, se tuvo en cuenta la presión atmosférica, temperatura ambiente diaria y humedad relativa, con datos obtenidos de la estación meteorológica del aeropuerto de Vanguardia – Villavicencio.

Tabla 9. Características del montaje.

Identificación de biodigestores	Contenido	Excretas	Inóculo	Cascarilla de arroz
1	Control		400 ml	
2	Control + soda cáustica		400 ml	
3	Solución de excretas porcinas + inóculo	200 ml	200 ml	
4	Solución de excretas porcinas + inóculo + soda cáustica	200 ml	200 ml	
5	Solución de excretas porcinas + inóculo + cascarilla de arroz	200 ml	200 ml	1,0 gr 1,5 gr 2,0 gr 2,5 gr
6	Solución de excretas porcinas + inóculo + cascarilla de arroz + soda cáustica	200 ml	200 ml	1,0 gr 1,5 gr 2,0 gr 2,5gr

Nota. Descripción de las proporciones de los sustratos en cada uno de los biodigestores, especificando a su vez, la organización de los mismos en el montaje experimental. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

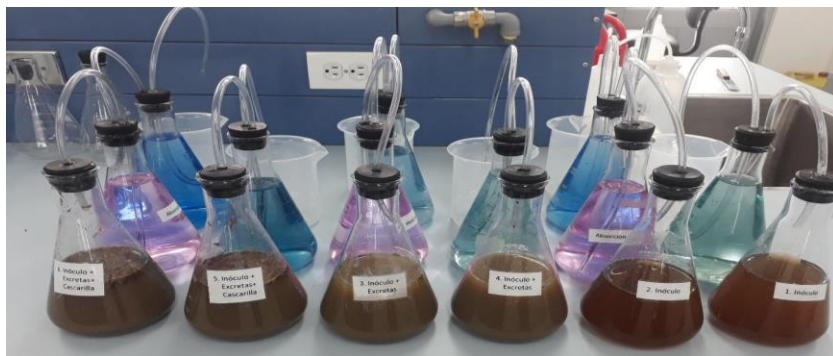


Figura 8. Montaje experimental prueba piloto. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.



Figura 9. Montaje final. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

7.3. Análisis de resultados y graficas de curvas de producción de biogás y metano

7.3.1 Cálculo de volumen de Biogás obtenido

Para normalizar el volumen de Biogás obtenido, se aplicó la expresión matemática dada por el manual alemán de ingeniería VDI-4630 (2006), el cual se basa en una medición volumétrica estandarizada en la metodología (APHA).

$$V_0 = V_1 * \left(\frac{((P_1 - P_w) * T_0)}{(P_0 * T_1)} \right)$$

Donde:

V0: Volumen de biogás normalizado (m³)

V1: Volumen de biogás medido a temperatura T1 y presión P1

P1: Presión a la que se midió el biogás (mbar) - Presión atmosférica diaria de Villavicencio

Pw: Presión de vapor del agua a la temperatura T1 (mbar)

T1: Temperatura a la que se midió el biogás (K) – Temperatura diaria de Villavicencio

P0: Presión normal (1013,25 mbar)

T0: Temperatura normal (273,15 K)

Para la normalización del volumen de Biogás obtenido, los datos fueron tomados de la estación meteorológica de Apiay, en la ciudad de Villavicencio.

7.3.2 Cálculo de potencial del Biogás obtenido

Para calcular el potencial de Biogás obtenido, se aplicará la expresión matemática dada por el manual alemán de ingeniería VDI-4630 (2006), durante el tiempo experimental para los datos obtenidos.

$$Pe = \frac{VB}{Ms}$$

Donde:

VB: Volumen de biogás acumulado durante el tiempo de digestión t (ml)

Ms: Masa de sustrato adicionada al reactor en términos de sólidos volátiles (grSV).

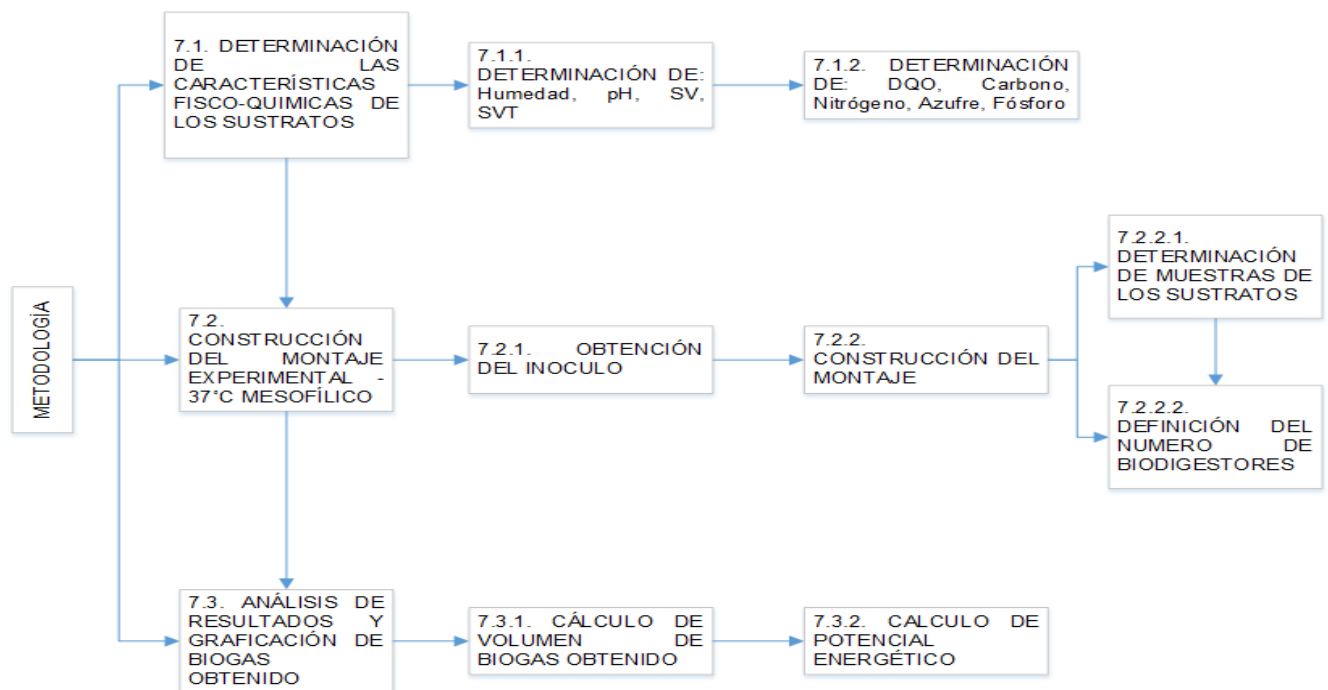


Ilustración 2. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

7. Resultados y análisis

7.1. Caracterización de los sustratos (cascarilla de arroz y excretas) e inóculos.

7.1.1. Cascarilla de arroz

La Tabla 10 presenta los parámetros físico – químicos que se analizaron al co-sustrato cascarilla de arroz.

Tabla 10. Caracterización del co-sustrato cascarilla de arroz

Sustrato	Solidos T (%)	Solidos V (%ST)	Humedad (%)	COT (%ST)	P (%ST)	S (%ST)
Cascarilla de arroz	81,80	79,80	19,38	48,91	0,00056	0.011

Nota. Características físico-químicas del co-sustrato cascarilla de arroz. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Las muestras de cascarilla de arroz para la presente investigación, fueron obtenidas del molino Roa en la ciudad de Villavicencio, cuya producción se centra en la obtención de arroz tipo Paddy; el molino Roa, obtiene la materia prima de productores de la región, en donde el tipo de adecuación del cultivo, varía entre cultivos de riego y secano, cuya diferencia principal radica en la obtención del agua (riego mecanizado y aguas lluvias respectivamente), sin embargo, el tipo de adecuación varía según el periodo del año; la región del Meta, se caracteriza por la adecuación de cultivos de tipo secano. (Fedearroz, 2011)

Los resultados con respecto al porcentaje de solidos volátiles y humedad para la cascarilla de arroz, indican que sus características son adecuadas para el proceso de degradación anaerobia, conteniendo el 79,80% de materia degradable en función de solidos volátiles y un porcentaje de humedad de 19,38% que se encuentran dentro del rango admisible no mayor a 30% de humedad, según (Valverde & Monteagudo, 2007), para considerarse como un sustrato apto para conversión energética.

En relación a los nutrientes necesarios para la producción de biogás por parte de las bacterias disponibles en el proceso, el co-sustrato indica la disponibilidad suficiente con respecto a COT, siendo este uno de los componentes principales para la alimentación bacteriana y por consiguiente la producción eficiente de Biogás;

En la Tabla 11 se observan datos de otras investigaciones relacionadas con la cascarilla de arroz reportados en estudios de diversos países.

Tabla 11. Comparación de características del sustrato Cascarilla de arroz

Parámetro	País	Proyecto	Cuba	Canadá	China	Uganda
Sólidos Totales (%)		81,80	89,2	-	-	79,43
Sólidos Volátiles (%ST)		79,80	77,8	66,4	55,2	61,68
Humedad (%)		19,38	11,8	-	-	10,57
COT (%ST)		48,91	37,7	37,6	37,6	29,98
N		-	0,38	0,38	1,9	0,42
P(%ST)		0,00056	-	-	-	-
S(%ST)		0,011	0,097	0,03	0,09	0,005

Nota. Comparación de las características físico-químicas del co-sustrato Cascarilla de arroz, tomados de diversas investigaciones realizadas a nivel mundial Datos tomados de: (Velasquez, 2013), (Olupot P & Walozi, 2016), (Pérez, 2010). Adaptado por Gutiérrez & Ochoa, 2019

Como se evidencia en la Tabla 11, el porcentaje de sólidos volátiles de la cascarilla de arroz obtenido en el presente estudio fue de: 79,80%, estando dentro del intervalo de los datos presentados a nivel mundial (países mencionados); estos valores indican un alto contenido de material degradable.

En relación al porcentaje de humedad, la variabilidad de los datos comparados, está sujeta a condiciones como: Proceso de producción arrocero, tratamiento post-cosecha, condiciones ambientales de la zona de producción, disposición (intemperie o almacenados) entre otros, lo que se evidencia en los porcentajes de humedad obtenidos en el presente estudio 19,38% respecto a los países de comparación por ejemplo Uganda con un 10,57%.

En cuanto a los valores obtenidos respecto a la disponibilidad de nutrientes, se evidencia que la cascarilla de arroz es un sustrato rico en carbono, con un valor medio a nivel mundial de

38,23(%ST), siendo óptimo para suplir la deficiencia de carbono de las excretas porcinas, dentro del proceso de co-digestión, así mismo los nutrientes evaluados en la Tabla 11 indican un bajo porcentaje de los mismos a partir de los datos comprados con diferentes países. De manera general los requerimientos de micro y macronutrientes (asociados a Nitrógeno, Fósforo y Azufre) en un proceso de digestión anaerobia son bajos, debido a su pequeña velocidad de crecimiento. (Agrowaste, 2012) A partir de las características de los sustratos se puede evidenciar que el proceso de co-digestión, permite compensar la deficiencia de nutrientes, es por ello que para los nutrientes como Fosforo y Nitrógeno de la cascarilla de arroz, los resultados de excretas porcinas, presentados a continuación aportan dichos nutrientes al proceso, reconociendo la importancia del nitrógeno como alimento de las bacterias en la fase metanogénica. (FAO, 2011)

7.1.2. Excretas porcinas

A continuación, se presentan los datos obtenidos a partir de la caracterización físico-química de las excretas porcinas.

Tabla 12. Caracterización de excretas porcinas

Sustrato	Solidos T (%)	Solidos V (%ST)	Humedad (%)	COT (mg/lt)	N (mg/lt)	P (mg/lt)	S (mg/lt)	Relación C/N
Excretas 1	37,9046	56,9966	58,7191	1.962,5	16.833,2	0,609	0,307	0,4
Excretas 2	29,9475	61,6025	70,4475	-	-	-	-	-

Nota. Características físico-químicas del sustrato excretas porcinas. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Las excretas porcinas, han sido uno de los sustratos de mayor uso en la investigación de procesos de digestión anaerobia para la obtención de biogás, debido a la gran disposición de dicho sustrato por la actividad pecuaria del país como a nivel mundial; como se evidencia en la Tabla 12, este sustrato posee nutrientes necesarios para el proceso de co-digestión, siendo esta la característica que lo hace óptimo para su uso; al determinar la relación C/N (0.4) del sustrato excretas, se evidencia una concentración de Nitrógeno elevada, lo que se puede deber a altos

niveles de orina presentes en las excretas; por lo tanto el valor obtenido está fuera del rango óptimo de funcionamiento dentro de un biodigestor oscilando en valores teóricos de 25 – 30:1.

- Excretas 1: Obtenidas a partir de cerdos mixtos en etapa de engorde; su alimentación comprende:



Figura 10. Cerdos mixtos y corral de crianza – Universidad de los Llanos. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

- Excretas 2: Obtenidas a partir de cerdas lactantes; su alimentación comprende: lavaza y concentrado



Figura 11. Cerda lactante – Institución Educativa Agrícola Guacavía. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Uno de los factores físicos que influyen en los parámetros de humedad y sólidos volátiles, es el hábitat (tales como corrales, cocheras y potreros); los cerdos mixtos se encontraban en corrales con lecho de aserrín, mientras que las cerdas lactantes habitaban en cocheras de cemento; lo anterior permite inferir que el porcentaje de humedad para la muestra de excretas tipo 1 es ligeramente inferior con respecto a la muestra de excretas tipo 2, que se evidencia en la Tabla 12.

En cuanto a la disponibilidad de nutrientes en las excretas, ésta se encuentra relacionada con la etapa de vida o de producción porcina, lo que a su vez está asociada a la capacidad digestiva respecto a los alimentos; en relación a la producción de Biogás, las excretas de cerdos mixtos tienen un mejor rendimiento en producción de metano según (Zhang Wanqin & Wu, 2014), en contraste con las cerdas lactantes, es por ello que para la presente investigación se utilizó las excretas tipo 1.

7.1.3. Inóculos

A continuación, se describen los datos obtenidos a partir de la caracterización físico-química de los inóculos usados en la presente investigación, además de la comparación con valores obtenidos de diversas fuentes.

Tabla 13. Caracterización de inóculos

Biomasa activa	Origen	Solidos Totales (%)	Solidos Volátiles (%ST)	Humedad (%)	DQO (mg/lt)	pH	Relación DQO/SV
	I.E.A.						
Inóculo 1	Guacavía	0,6052	31,9612	99,4050	4.616	6,89	-
	Rector piloto						
Inóculo 2	(USTA)	0,7826	29,7025	99,5710	1.539,285	5,3	0,66
	Reactor tubular						
	(La						
Inóculo 3	Cosmopolitana)	0,1425	27,3368	99.2289	3.520,21	7,05	0,90

Nota. Características físico-químicas de las diferentes muestras de inóculo implementadas para la investigación. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

En la Tabla 13 se evidencia homogeneidad en los datos de caracterización física para las tres muestras de inóculo, en la que se puede establecer un rango de solidos totales inferior al 1% en contraste con la humedad, al ser un fluido de digestión donde su función principal es ser base de la riqueza microbiana en los biodigestores y permitiendo la mezcla de los sustratos.

A partir del proceso experimental, se observó que la calidad del inóculo está relacionada directamente la naturaleza de los sustratos de alimentación; lo que a su vez es un factor en la producción de biogás en los reactores tipo Batch, lo cual se evidencio en la segunda corrida experimental al utilizar el Inoculo 2 , el cual presento un pH acido 5,3, fuera del rango de pH óptimo para el proceso, debido a la presencia de cascara de naranja, utilizada en la alimentación del reactor del cual se obtuvo este inóculo. La Tabla 14, presenta diferentes valores relación DQO/SV proveniente de inóculos de diferentes sustratos y biodigestores.

Tabla 14 . Comparación de Inóculos de diferentes operaciones en condiciones mesofílicas

Sustrato	Operación	ST (%p/p)	SV (%ST)	DQO (mg/lt)	Relación DQO/SV	Fuente
Excretas porcinas y bovinas	Planta de biogás industrial	5,0	74,0	62.000	1,67	Mähnert (Alemania)
Excretas porcinas + diferentes cofermentos agrícolas	Planta de biogás piloto	4,9	66,7	49.600	1,50	Schöen (Austria)
Excretas porcinas + restos de comida	Planta de biogás piloto	4,2-5,2	76	48.000	1,21-1,51	Gronauer (Alemania)
Excretas porcinas + restos de comida	Planta de biogás industrial	4,9	60	49.000	1,67	Wittmund (Alemania)
Agua residual	PTAR	1,2-2,3	39-60	-	1,4	Parker (Canadá)
Agua residual	PTAR	1,6-2,3	37	-	1,6	Sánchez (Cuba)

Nota. Rojas, C. Simulación y modelamiento del proceso anaerobio para la producción de biogás con diferentes sustratos. Tesis de Doctorado. Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania (2014). Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

Una aproximación de la población bacteriana se puede realizar a través de la comparación de las características fisicoquímicas del inóculo (DQO, ST y SV). En la Tabla 14 se puede observar

estos valores para diferentes operaciones del proceso anaerobio. Al comparar la relación DQO/SV, se evidencian valores similares. Sin embargo, se encuentran diferencias en los sólidos totales y los sólidos volátiles que pueden dar idea de la población bacteriana en general. El proceso en PTAR genera un inóculo muy diluido <2,3 % ST, con unos SV por debajo del 50 %, indicativo de una menor proporción de bacterias (Rojas Reina, 2014) Se observa claramente que al usar excretas y otros cofermentos aumenta a más del doble los ST y por consiguiente la población de bacterias, al aumentar la cantidad de sustrato disponible.

Para el caso de la presente investigación, las concentraciones de los inóculos son bajas en relación a los ST y SV (ver Tabla 13) con respecto a los valores obtenidos para las plantas de Biogás de tipo industrial y piloto presentados en la Tabla 14; lo anterior debido a que son inóculos muy diluidos y con un único sustrato de alimentación, como resultado de la toma de muestra a la salida de los biodigestores. A partir de esto se estableció que la población bacteriana presente en los inóculos es ligeramente baja, dado por la relación DQO/SV. La relación DQO/SV, indica la calidad del inóculo con respecto al contenido de materia orgánica disponible para la conversión energética, lo que determinó que el Inoculo 3(Reactor Cosmopolitana), presentó una mejor calidad y rendimiento respecto al Inoculo 2(Reactor USTA), lo cual se puede contrastar con la producción de Biogás de las corridas 3 y 4; lo anterior se determinó teniendo en cuenta el Anexo B- Fase 7.

- Inoculo 1: alimentación específica de excretas porcinas de cerdas lactantes y agua



Figura 12. Biodigestor Institución educativa Guacavía. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

- Inoculo 2: alimentación de excretas porcinas y agua



Figura 13. Biodigestor Centro Agroecológico la Cosmopolitana. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

- Inoculo 3: alimentación de excretas de crías de cerdo, cascara seca de naranja y agua



Figura 14. Biodigestor USTA-Villavicencio. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

7.2. Análisis de producción de biogás y metano

En las Tablas 15 a la 18; se evidencia el pH inicial previo al monitoreo diario durante el tiempo de medición establecido (15 días) y pH final. Las curvas de producción de Biogás, tienen en cuenta variables ambientales como temperatura, presión y humedad relativa para la normalización de los datos de producción, tomados de la estación meteorológica del aeropuerto Vanguardia de la ciudad de Villavicencio. A pesar de que los reactores se mantuvieron dentro de una incubadora a 37°C y por consiguiente el gas desplazado se encontraba a esta misma temperatura, fue necesario realizar la normalización para comparar con otros datos experimentales, ya que en otros experimentos se utiliza control por temperatura a través de Baño de María, lo que implica que el gas producido no se almacene a esta temperatura, si no a la temperatura ambiente del Laboratorio, estas variaciones

de temperatura modifican el volumen del gas, por lo que se ha estandarizado el reporte de los datos normalizados (Holliger & Angelidaki, 2016).

- **Corrida 1**

Tabla 15. pH inicial y final – corrida 1

pH	Excretas + inóculo		Excretas + inóculo + cascarilla de arroz		Gramos de cascarilla de arroz (grSV)
	Reactor 3	Reactor 4	Reactor 5	Reactor 6	
Inicial	7,42	7,55	7,75	7,98	0.65
Final	7,35	7,35	7,25	7,33	

Nota. Valores de pH obtenidos en la corrida experimental 1. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

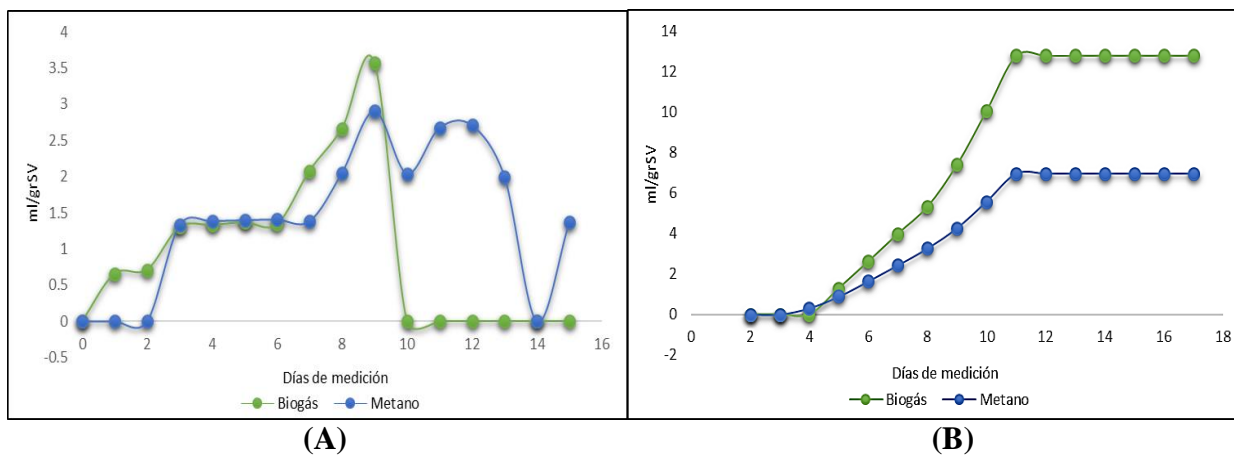


Figura 15. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas–Corrida 1. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

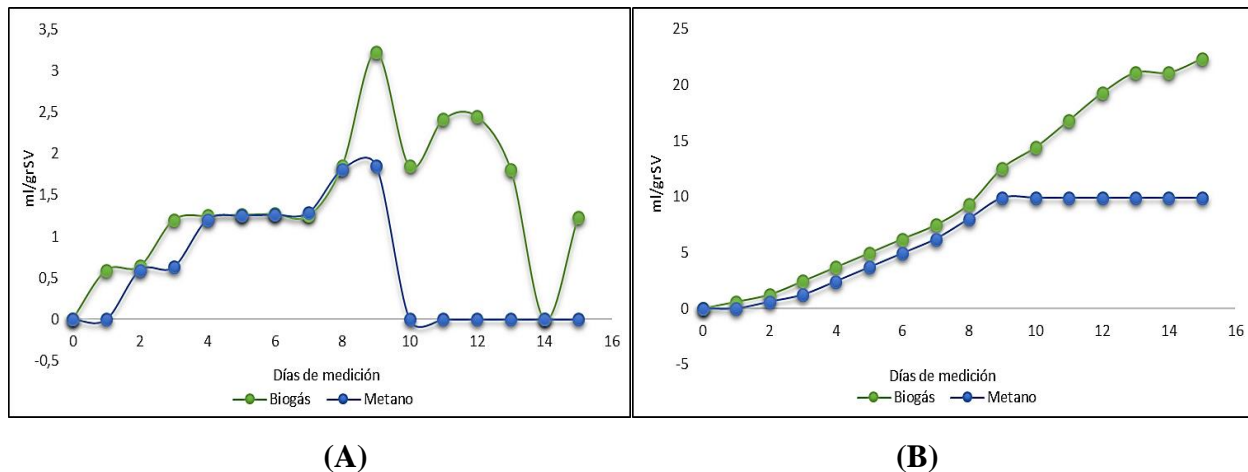


Figura 16. Curvas de producción diaria(A) y diaria acumulativa (B)de biogás y metano, del co-sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 1. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

Las Figuras 15 y 16, describen la producción de Biogás y gas metano para los sustratos en co-digestión; las curvas de producción diaria permitieron identificar el inicio de producción de Biogás para las excretas, el cual fue el día 3 y para el biodigestor con cascarilla de arroz el día 1, respecto al tiempo de retención establecido (15 días).

Las excretas presentaron una mayor producción de Biogás durante los días 7-9 de aproximadamente 7,45ml/grSV, siendo el día 9 el de mayor producción, generando 2,70ml/grSV; en contraste con el biodigestor con cascarilla de arroz, donde los días de mayor producción fueron 8-13 produciendo 11,79 ml/grSV, y el pico más alto se obtuvo el día 9 con 3,22 ml/grSV; se evidencia un rango de producción máxima para ambos sustratos en un periodo semejante, a la mitad del tiempo de retención.

En cuanto a las curvas diarias acumulativas, permitieron identificar el momento en el que disminuye la producción para ambos casos; como se identifica en la Figura 15-(B) de las excretas en el día 10 se alcanza la asíntota, para Biogás y metano, lo que indica que el sustrato ya no se degrada más; en comparación el biodigestor con cascarilla de arroz el cual mantuvo la producción a lo largo del periodo de retención, lo que permite inferir que el mismo presentaba mayor disponibilidad de material degradable.

- **Corrida 2**

Tabla 16. PH inicial y final – corrida 2

pH	Excretas + inóculo		Excretas + inóculo + cascarilla de arroz	
	Reactor 3	Reactor 4	Reactor 5	Reactor 6
Inicial	6,4	6,37	6,56	6,6
Final	6,2	6,18	6,3	6,4

Nota. Valores de pH obtenidos en la corrida experimental 2. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

La Tabla 16 muestra los valores obtenidos de pH inicial y final para los biodigestores con contenido de excretas y excretas con cascarilla de arroz, donde se evidencia una ligera acidificación del medio en cada uno de ellos, generado previsiblemente por los ácidos que se producen en el proceso de digestión anaerobia.; sin embargo, esta variación no influye en una caída significativa del pH neutro que se debe conservar en el reactor.

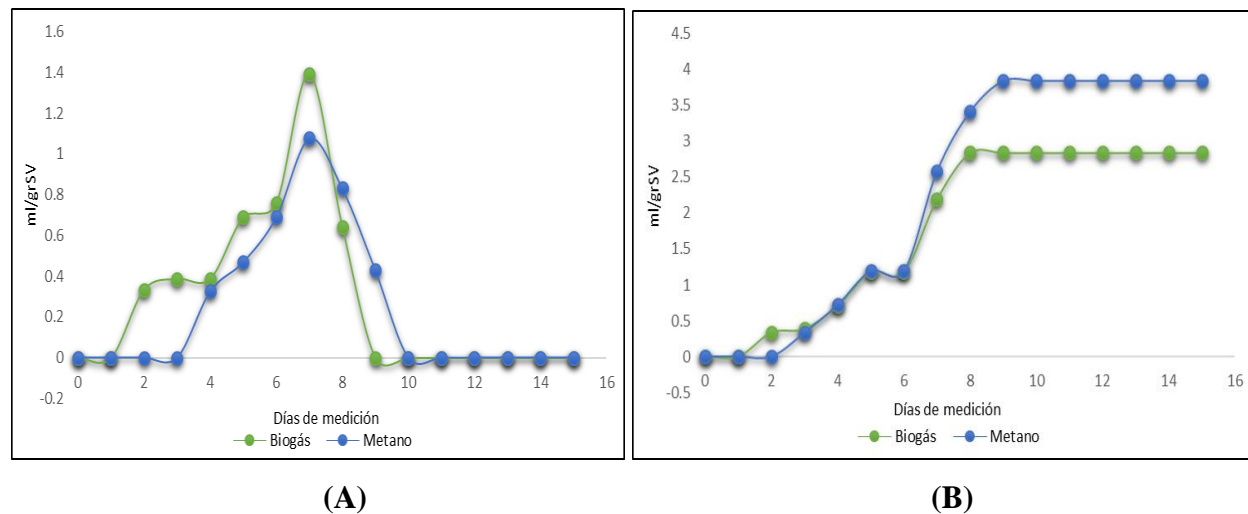


Figura 17. Curvas de producción diaria(A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas–Corrida 2. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

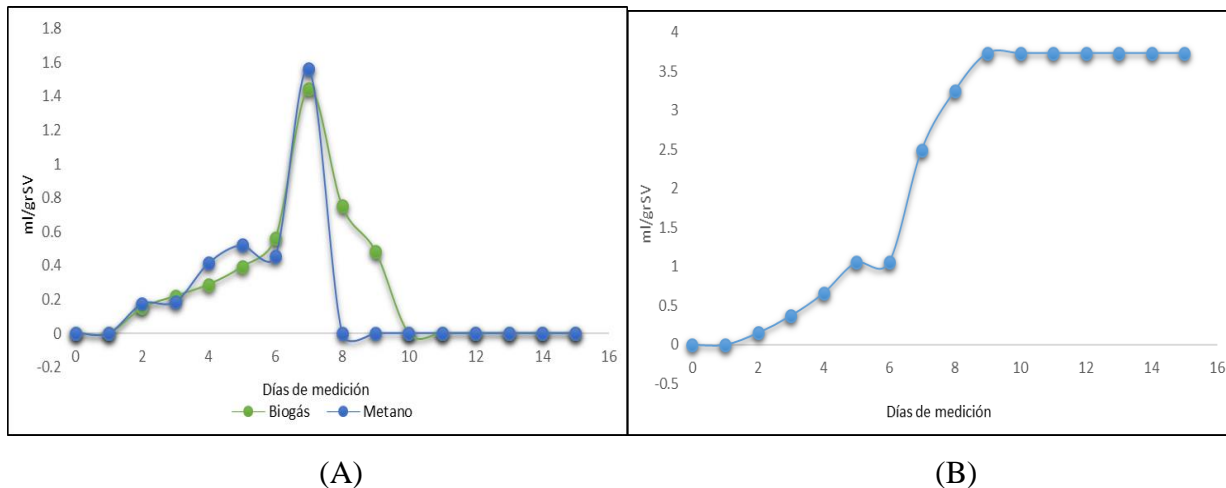


Figura 18. Curvas de producción diaria de biogás y metano (A) y diaria acumulativa de biogás (B), del co-sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 2. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

La curva de producción diaria (A) de las excretas (Figura 17 y 18), permite observar un comportamiento inestable en la producción tanto de biogás como CH_4 , donde el pico más alto de rendimiento se alcanzó el día 7, con una producción de 1,01 ml/grSV de biogás; lo que a su vez concuerda con el día de mayor producción del biodigestor con cascarilla de arroz (día 7: 1,44ml/grSV de biogás). Estos valores son menores al inóculo empleado, ya que este se encontraba a un $\text{pH} = 5,3$, que al mezclarse con las excretas subió a 7,3 este cambio de pH pudo haber afectado negativamente a las bacterias.

Las curvas acumulativas para ambos casos, alcanzan un comportamiento estable el día 8, lo que indica que los sustratos contenidos ya no se van a degradar y por consiguiente se detuvo la producción de biogás y metano. Se debe mencionar que, debido a problemas con el reactor de medición del metano, no se pudo obtener el valor del metano producido en esta corrida para la mezcla de excretas y cascarilla Figura 18-(B).

- Corrida 3

Tabla 17. PH inicial y final – corrida 3

pH	Excretas + inóculo		Excretas + inóculo + cascarilla de arroz	
	Reactor 3	Reactor 4	Reactor 5	Reactor 6
Inicial	5,2	6.92	7,25	7,18
Final	6,7	7,79	7,67	7,37

Nota. Valores de pH obtenidos en la corrida experimental 3. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

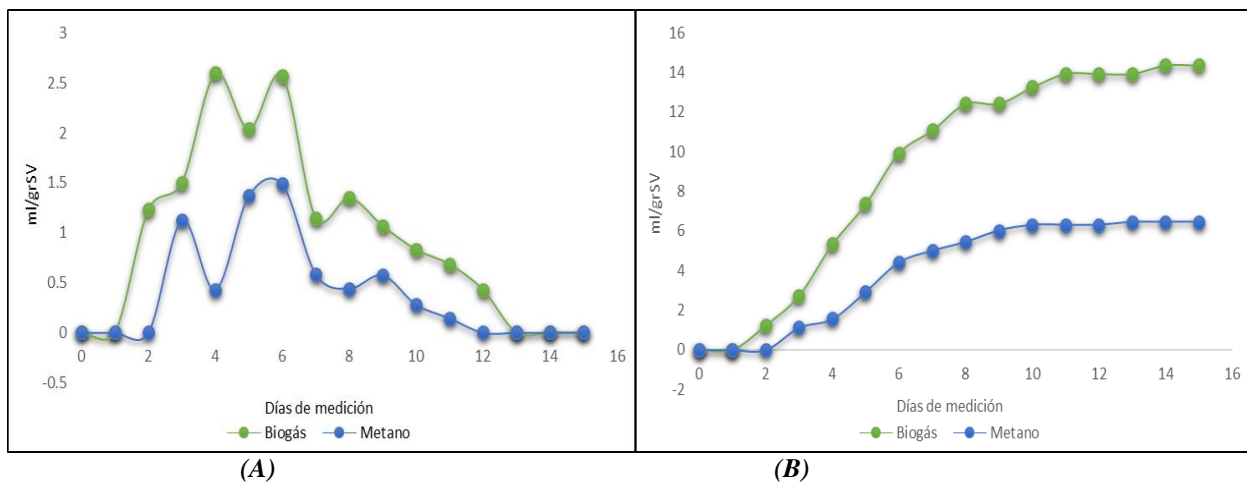


Figura 19. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas – Corrida 3. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

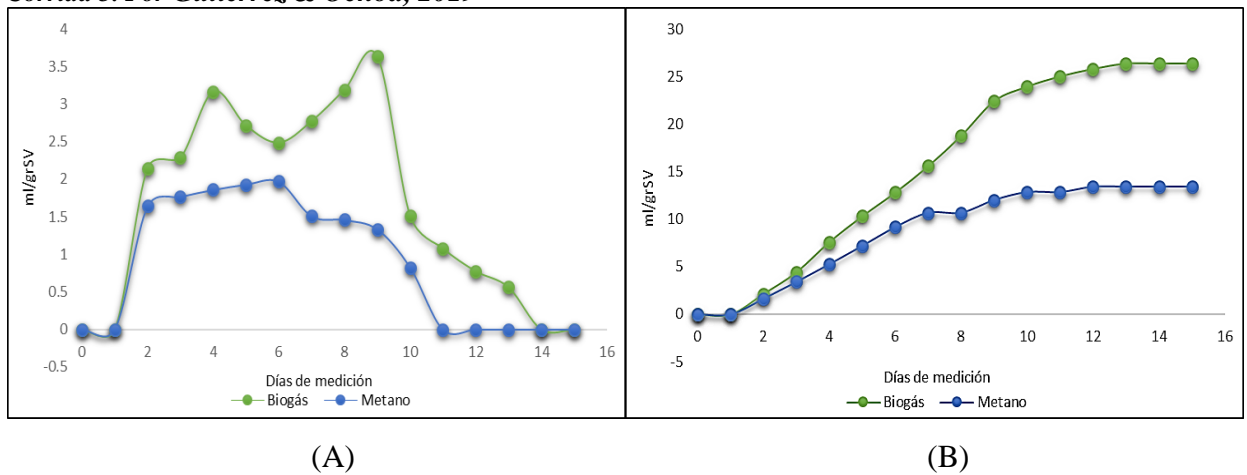


Figura 20. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del co- sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 3. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

El comportamiento diario de la producción de biogás y CH₄ para las excretas porcinas presentado en la Figura 19-(A), indica inestabilidad en el proceso de digestión al oscilar entre picos

altos de producción y la detención súbita de la misma a lo largo del periodo de medición; sin embargo, entre los días 4-6, se registra los valores más altos con una producción total de 7,20ml/grSV, a diferencia de la curva de producción diaria del biodigestor con cascarilla de arroz, Figura 20-(A), con una tendencia exponencial hasta el día 9 (3,63 ml/grSV), siendo ésta pertinente de un proceso de producción de Biogás; pese a la variación de los resultados del proceso, se registró datos de producción en ambos casos hasta el día 13, potencializando la eficiencia del mismo.

Lo anterior se relaciona con las curvas de producción acumulativas para ambos casos, que se presentan en las Figuras 19 y 20 – (B), ya que la tendencia de las mismas es de tipo exponencial y en ellas la producción se detiene alrededor del día 14, lo que quiere decir que en ambos biodigestores la producción de Biogás y CH₄, fue constante a lo largo del periodo de retención.

De manera general, la corrida se desarrolló en términos de lo esperado debido al inóculo usado (inóculo 3), obtenido de un biodigestor rural operado en el Centro Agroecológico la Cosmopolitana y de alimentación específica de excretas porcinas, condiciones que favorecen la riqueza y actividad microbiana, lo que permitió la producción continua de biogás y CH₄ hasta la finalización del tiempo de retención.

- Corrida 4

Tabla 18. pH inicial y final – corrida 4

pH	Excretas + inóculo		Excretas + inóculo + cascarilla de arroz	
	Reactor 3	Reactor 4	Reactor 5	Reactor 6
Inicial	7,41	7,43	7,42	7,40
Final	7,44	7,46	7,44	7,33

Nota. Valores de pH obtenidos en la corrida experimental 4. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

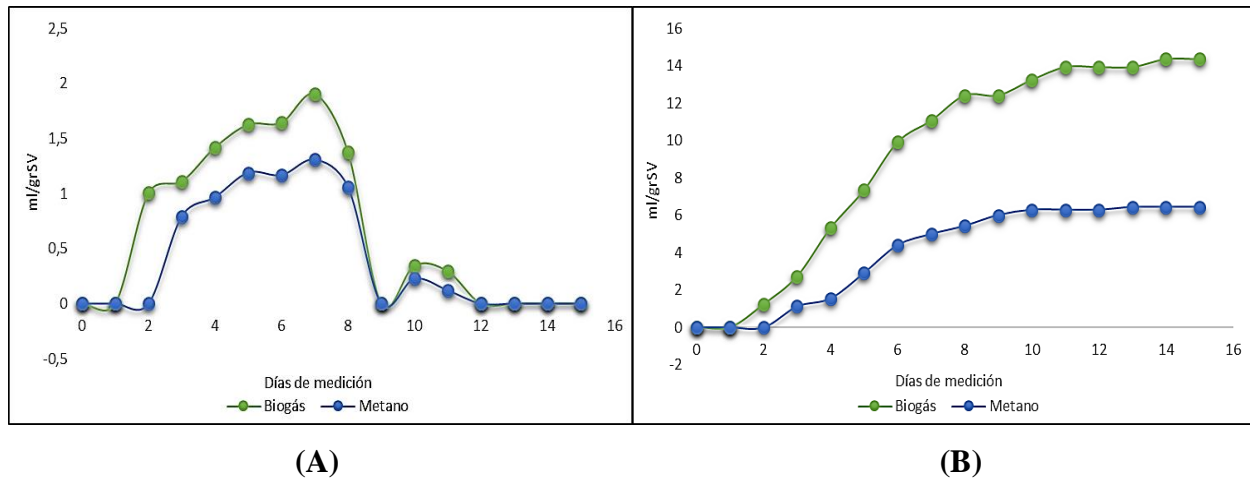


Figura 21. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del sustrato excretas – Corrida 4. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

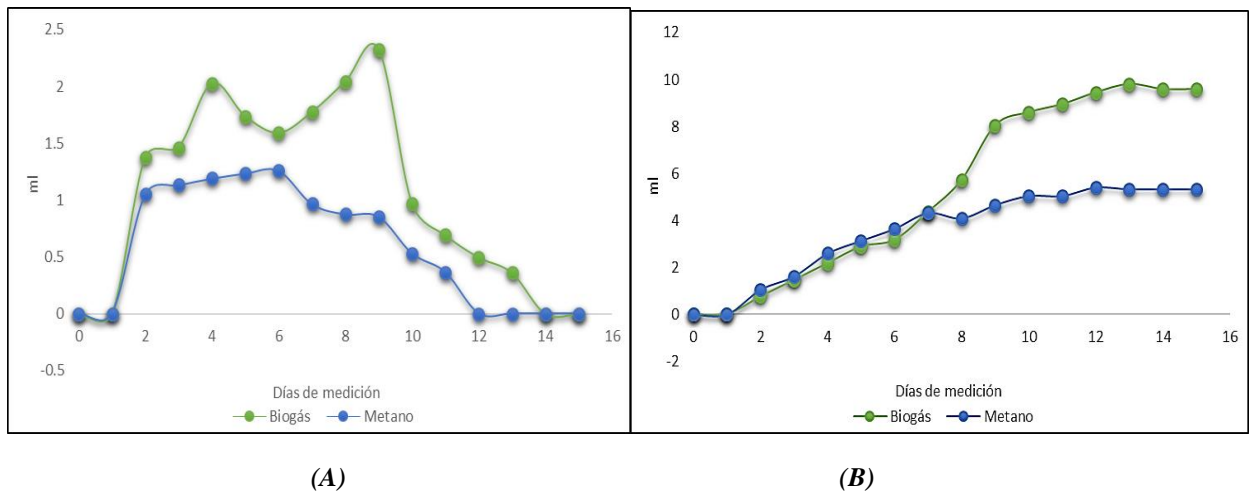


Figura 22. Curvas de producción diaria (A) y diaria acumulativa (B) de biogás y metano, del co-sustrato Cascarilla de arroz – Corrida 4. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019

Las curvas de producción diaria para ambos sustratos, muestran una producción de tipo exponencial estable hasta el día 7; para el caso de las excretas la mayor producción se registró el día 7 (1,90ml/grSV) y para el biodigestor con cascarilla de arroz el día 9 (2,32ml/grSV), en relación a la producción de Biogás.

La producción acumulativa presentada en la Figura 21-(B) de las excretas, señala que se obtuvo una mayor producción de Biogás, con respecto a CH₄, la cual se detiene en el día 14 del proceso, en contraste con la curva de producción presentada en la Figura 22-(B) del biodigestor con cascarilla, en la que la producción de Biogás y CH₄ es ligeramente similar y se aumenta significativamente hacia el día 8; destacando que para el mismo día se disminuye la producción de

metano, alcanzando la estabilidad el día 13; esto debido posiblemente a la contaminación de la trampa de captura de CO₂ responsable del desplazamiento de CH₄.

Esta corrida, junto con la corrida 3, presentan un comportamiento grafico similar en la producción, debido a que se utilizó el mismo inóculo (Inoculo 3), siendo éste uno de los mejores con respecto a la caracterización de los demás inóculos.

El análisis individual de cada una de las corridas, permitieron identificar las variaciones y el comportamiento general de los sustratos influenciados por los cambios asociados a los inóculos y sustratos; es por estos cambios que se determina el potencial energético asociado a la mezcla de sustratos para poder realizar comparaciones que permitan establecer si la producción de biogás obtenida en la experimentación se puede considerar como baja o alta; sin embargo según la bibliografía asociada a estudios como por ejemplo: (Velasquez, 2013), (A.Neshat, Mohammadi, D.Najafpour, & Lahijani, 2017), (Rojas Reina, 2014); mencionan que de manera general el comportamiento en cada una de las corridas es el habitual tanto para las excretas porcinas como uno de los más estudiados como para la cascarilla de arroz.

7.3. Determinación del potencial energético del co-sustrato cascarilla de arroz.

A continuación, se presentan los datos finales de cada corrida con respecto a la determinación del potencial energético de los sustratos (ver Tabla 19).

Tabla 19. Características finales del potencial energético de los sustratos

Corridas	Gramos de cascarilla de arroz (grSV)	Proporción de metano en el Biogás (%)	Potencial energético de excretas (ml/grSV)	Potencial energético de cascarilla (ml/grSV)	Potencial energético de cascarilla y las excretas porcinas (ml/grSV)
Corrida 1	0,65	44	12,79	9,56	22,56
Corrida 2	0,97	-	2,83	0,89	3,73
Corrida 3	1,63	51	14,37	11,97	26,89
Corrida 4	1,30	57	13,22	12,56	25,68
Promedio	-	-	10,80	9,51	20,81
Desviación	-	-	4,63	4,57	9,17

Nota. Potencial energético de excretas calculado a partir de 6,17266grSV en biodigestor. Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Los datos sintetizados en la Tabla 19, permitieron identificar las características principales de la producción de Biogás a lo largo del montaje experimental, evidenciando la variabilidad en la producción de cada sustrato (excretas y cascarilla de arroz), con respecto al proceso de co-digestión al mezclar los sustratos.

Dentro de los componentes principales del Biogás, se encuentra el CH₄, el cual constituye una fracción del mismo, que varía entre 50 – 70% según (FAO, 2011); los resultados del gas metano obtenido en el montaje experimental, demuestran valores dentro del rango establecido (44-57) indicando una composición del producto final óptima para su conversión y aprovechamiento energético.

Con el fin de analizar el potencial energético de los sustratos en co-digestión, se evaluó la producción individual de los mismos de manera cuantitativa; donde se obtuvo un valor de potencial energético medio para las excretas de 10,80ml/grSV, y para la cascarilla de arroz de 9.51ml/grSV, destacando que para efectos de funcionamiento de los biodigestores la proporción de excretas usadas en cada uno fue mayor con respecto a la cantidad de cascarilla de arroz. Con lo anterior, se estableció que la mezcla de los sustratos permitió incrementar la producción de Biogás aproximadamente en un 60% y a su vez aumentar el potencial energético del proceso de co-digestión, obteniendo 20.81ml/grSV. Sin embargo, los valores establecidos anteriormente son relativamente bajos al analizar la relación C/N como se menciona en el capítulo de análisis de las excretas, debido a los altos niveles de nitrógeno con respecto a la fuente de carbono, esto ocasiona que se presente inhibición en la producción de biogás, ya que generalmente del total de nitrógeno la mayor parte se encuentra en su forma amoniacal (NH₄⁺), lo cual es un importante factor de inhibición del proceso anaerobio (Orhan & B, 2013). Si bien se puede realizar el proceso anaerobio con altas concentraciones de amonio, no se alcanza el máximo potencial posible de producción de biogás (Angelidaki, L, & B, 1993). Sin embargo, no hay que olvidar que la producción de biogás, también dependerá de otros factores como el tipo de inóculo, el tipo de sustrato, pH, temperatura y agitación. Diferentes estudios indican que con concentraciones superiores a 5000 mg/L de Nitrógeno Total se observa inhibición (Orhan & B, 2013), por consiguiente con los resultados de este parámetro en el presente estudio es inevitable la inhibición.

Al comparar estos resultados con los obtenidos dentro del proyecto macro “Determinación del potencial de biogás de diferentes sustratos para la co-digestión anaerobia con excretas animales” donde Diego Felipe Martínez Monsalve utilizó excretas de la Universidad de Los Llanos en régimen semicontinuo y obtuvo una producción de 66 ml/g SV para estas excretas, observándose que la agitación jugó un rol relevante.

Para conocer un panorama general del potencial energético de la Cascarilla de arroz, se realizó una comparación en cuanto a parámetros operacionales y variables del proceso de digestión anaerobia, que se evidencian en la Tabla 20.

Tabla 20. Comparación de potencial energético de la Cascarilla de arroz.

	Temperatura	Tipo de reactor	Capacidad de los reactores (ml)	Espacio de fase gaseosa (%)	Tiempo de retención	Potencial energético (ml/grSV)
Cascarilla de arroz - Cuba	Mesofílico (37°C)	Discontinuo. agitación manual	2000	20%	36 días	7,3
Cascarilla de arroz - proyecto	Mesofílico (37°C)	Batch única carga, sin agitación	700	43%	15 días	9,51

Nota. Comparación de variables operativas y potencial energético de la presente investigación frente a una investigación realizada en Cuba, Datos tomados de: (Velasquez, 2013). Por Gutiérrez & Ochoa, 2019.

Los resultados del potencial energético para ambos casos, están influenciados de manera general por las características físico-químicas de la Cascarilla de arroz y las condiciones operativas del proceso como se ha mencionado en los análisis relacionados con el potencial energético de los sustratos del proyecto. Teniendo en cuenta la comparación realizada en la Tabla 11, se identificó que la cascarilla utilizada para el presente estudio presenta condiciones de mayor humedad y material degradable determinado por los SV Y COT, en comparación con las características establecidas en el estudio realizado en Cuba, así mismo, las condiciones operativas establecidas para cada uno de los montajes experimentales, son de gran importancia en la obtención del potencial energético; por ejemplo en el caso de Cuba, el tiempo de retención del proceso fue mayor

(36 días) en comparación con el tiempo establecido en la presente investigación, sin embargo es importante tener en cuenta que el proceso de digestión anaerobia alcanza una estabilidad en un momento dado de la producción, en donde los sustratos ya no son degradado (por diferentes causas, como la calidad del inóculo, agitación o factores de inhibición), lo anterior indica que no se presenta una relación directamente proporcional entre el tiempo de retención y la producción de biogás que se identifica en los valores de potencial energético comparados (Rojas, Fang, & Uhlenhut, 2010).

Otro de los parámetros que tienen incidencia en el proceso, es el volumen de llenado de los sustratos en los biodigestores, dado que se debe garantizar un espacio óptimo de almacenamiento de Biogás que varía entre 40-50% de la capacidad total de los biodigestores (FAO, 2011), lo anterior permite que no se aumente la presión dentro del biodigestor, lo que podría ocasionar daños en el mismo afectando la medición diaria; como se evidencia en la Tabla 20, el espacio de obtención del Biogás fue de 20% para Cuba y del 43% del presente estudio, lo que influye a su vez en los datos de potencial energético presentados.

8. Discusión de resultados

Los resultados de la presente investigación, permitieron establecer que el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás, presenta una mejora en la eficiencia del mismo, que se evalúa con el incremento del producto final obtenido al someter dos sustratos a un proceso de co-digestión anaerobia, generando una producción media de biogás de 20,81ml/grSV expresada en términos de potencial energético.

Para el presente estudio se utilizó excretas porcinas y cascarilla de arroz como co-sustrato; ya que la composición del mismo se basa principalmente de polímeros orgánicos, indicando alta disponibilidad de carbono orgánico degradable, por lo cual su principal función dentro del proceso, radicó en suplir el déficit de carbono de las excretas, determinada por la baja relación C/N (0,14) obtenida en la caracterización, siendo el carbono la principal fuente de energía para los microorganismos.

La eficiencia del proceso de co-digestión está determinada por las variables y parámetros involucrados en el mismo, las cuales están relacionadas y determinan la estabilidad del proceso, por lo que su monitoreo y control resultó ser de gran importancia. Una variación fuera de los valores óptimos de funcionamiento en alguna de las variables, interviene de manera directa al metabolismo bacteriano, lo que afecta la cantidad y calidad del biogás que se obtiene. (Lindmark, 2014). Las variables principales que intervinieron en el desarrollo del montaje experimental, fueron: pH (afectando la producción de biogás de la corrida 2, por la acidificación del inóculo tipo 2), calidad del inóculo, expresada en términos de la relación DQO/SV y altos niveles de nitrógeno (determinado en la relación C/N del sustrato excretas, inhibiendo la producción de biogás). De los diferentes inóculos usados en el estudio, el Inóculo 3, el cual permitió una mayor estabilidad en el proceso de digestión anaerobia desde el punto de producción continua durante la fase experimental, así como en la cantidad y cantidad del biogás obtenido en las Corridas 3 y 4, considerando que las temperaturas se encontraron dentro del rango mesofílico (37 °C). Este trabajo brinda un aporte al estudio de las energías alternativas de bajo costo para el departamento del Meta, donde se presentan zonas que por sus características geográficas el acceso a fuentes energéticas es limitado.

Conclusiones

- Se determinó que las características físico-químicas del co-sustrato cascarilla de arroz utilizado para el proceso de co-digestión, se encuentran dentro de los valores contrastados con otras caracterizaciones a nivel mundial mencionados en la Tabla 11, como las asociadas a SV Y ST (79,80 y 81,80), respectivamente y una disponibilidad de carbono de 48,91%; considerándose viables para la conversión energética mediante el proceso de co-digestión anaerobia.
- Mediante el análisis de la producción en las diferentes corridas experimentales, se estableció que los días de mayor producción oscilan entre el día 6-10 del tiempo de medición establecido y el periodo promedio en el que la producción disminuye asociados a las corridas 1 y 2 entre los días 10-12; lo anterior teniendo en cuenta las variables que intervinieron durante el proceso como tiempo de digestión, y temperatura.
- Se estableció que el potencial energético medio respecto a las corridas realizadas de la cascarilla de arroz en co-digestión con excretas porcinas es de: 20,81ml/grSV y la de las excretas porcinas es de 10,80ml/grSV, expresada en términos de biogás, lo que indica el incremento del potencial energético al unificar los sustratos.
- Se concluye que la calidad del inóculo como medio de digestión, está directamente relacionado con el tiempo en el que permanece en un biodigestor en funcionamiento óptimo y con la disponibilidad de nutrientes proporcionado por la alimentación (carga orgánica de entrada del biodigestor), lo anterior determinado por la relación de DQO/SV (0.90) Inoculo 3.

Recomendaciones

Previo a la puesta en marcha del montaje experimental y/o funcionamiento de los biodigestores, se recomienda garantizar que el inóculo como medio de digestión, haya tenido un periodo mínimo de operación que oscile entre 1 a 3 meses, ya que el inóculo usado en la corrida 2 al estar un tiempo inferior a 1 mes en el reactor de origen influyó en la disminución de la producción de biogás por su pH ligeramente ácido (5,7) y relación DQO/SV baja (0,66); lo anterior, asegurando que posea las propiedades y/o condiciones idóneas para potencializar el proceso de producción, como, por ejemplo: características microbiológicas (riqueza y actividad microbiana).

Se recomienda realizar pruebas y/o ensayos previos, con diferentes recipientes preferiblemente herméticos, para de esta manera minimizar los factores externos que influyen en la producción; el garantizar la selección adecuada de los recipientes, permite asegurar la producción continua de biogás y metano a lo largo del tiempo de experimentación, evitando el sesgo cuantitativo en los datos de medición; se recomiendan recipientes de vidrio con única forma.

Para la implementación de esta tecnología como fuente de energía alternativa en zonas rurales del departamento del Meta, se recomienda someter el proceso a condiciones ambientales reales (temperatura, presión, humedad ambiental), para evaluar la eficiencia de los sustratos (y por ende evaluar su potencial máximo de producción de biogás) como del biodigestor y así mismo, identificar los cambios en los parámetros de diseño (por ejemplo, reactores con agitación).

Con el fin de mejorar el proceso de producción de biogás, se recomienda realizar más investigaciones relacionadas con los siguientes aspectos: efecto del inóculo dentro del proceso de co-digestión anaerobia, proporción idónea de carga orgánica (mezcla agua/sustrato – sugerencia de 1:2) e implementación de mecanismos de agitación dentro del proceso.

Por último, se recomienda realizar un pre-tratamiento manual a la cascarilla disminuyendo su tamaño en un 80%, para de esta manera evaluar las ventajas que puede tener sobre el proceso en términos de porcentaje de sustrato digerido, parámetro que indica la eficiencia del proceso.

Bibliografía

- A. Rezi and M. Allam,. (1995). Techniques in array processing by means of transformations . En *Control and Dynamic Systems Vol. 69* (págs. 133-180). San Diego: Academic Press.
- A.Neshat, S., Mohammadi, M., D.Najafpour, G., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *ELSEVIER*, 1-15.
- Agrowaste. (2012). *Digestión Anaerobia*. Barcelona: CSIC.
- Americarum Universitas. (2013). *Capitulo 5: Digestión anaerobia*. Madrid: Universitas.
- Angelidaki, I., L, E., & B, A. (1993). A Mathematical Model for Dynamic Simulation of. *Biotechnol.Bioeng*, 159-166.
- Arce, G. (2017). Panorama de las energías renovables en Colombia. *Ministerio de Minas y Energía*. Camara de Comercio de Colombia.
- BESEL S.A. (2007). *"Biomasa: Digestores anaerobios"*. Madrid: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).
- Bochno Hernández, E. (2011). *Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en Colombia*. Bogotá: Oficina regional para America latina y el Criebe – RLC.
- Borda, C. (2016). *Biogás: Una alternativa energética para los rellenos sanitarios*. Obtenido de Universidad Militar Nueva Granada: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/15271/1/BordaPerezCarlosGeovanny2016.pdf>
- BP Energy Outlook . (2017). *Camara de Comercio Britanica en Mexico*. Obtenido de http://www.britchamexico.com/wp-content/uploads/2017/02/BP-Energy-Outlook-2017.esp_pw.pdf
- Comision Europea. (2012). *Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ambitos de la energía, la tecnología y la política climática - Aspectos Principales*. Bruselas.
- Coordinación de Energías Renovables. (2008). *Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa*. Buenos Aires: Secretaría de Energía.
- Cornare & Corantioquia. (2003). *Uso de la porquinaza como fertilizante*. Medellin: Ministerio de Medio Ambiente.

- DANE. (2016). *4° Censo nacional arrocero 2016*. Bogotá.
- FAO. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: MINENERGIA.
- Fedearroz. (2011). *Dinamica del sector arrocero en los Llanos Orientales de Colombia*. Obtenido de http://www.fedearroz.com.co/doc_economia/Dinamica_del_sector_arrocero_en_los_Llanos_orientales.pdf
- García A, A. (2016). *Estudio del comportamiento del tratamiento anaerobio de fangos ante modificaciones del pH*. Valencia: RiuNet.
- García R, R. (2001). *Combustión y combustibles*. Madrid.
- Holliger, C., & Angelidaki, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*.
- Hu Yu-ying, W. J., Li, H.-z., & Poncin, S. (2018). Study of and enhanced dry anaerobic digestion of swine manure: Performance and microbial community property. *Bioresource Technology*, 353-360.
- ICA. (2017). *Tabla de población bovina por municipio y por departamento 2017*. Bogotá .
- ICA, I. (2017). *Censo Pecuario Nacional*. Obtenido de <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2017.aspx>
- ICIDCA. (2012). *La Digestión Anaerobia. Aspectos teóricos parte I*. Ciudad de la Habana: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
- Lim Shiun, J., Manan Abdul, Z., Alei Wan, S., & Hashim, H. (2012). A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Sciences Direct*, 1-11.
- Lindmark, J. (2014). *The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste*. Suecia: Waste Management.
- Miao, L. L. (November 8-12). A specification based approach to testing polymorphic attributes. *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*. Seattle, WA, USA,.
- Migués Tábares J, L. (20 de abril de 2018). *Procesobio*. Obtenido de <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/PROCESOS+TERMOQU%C3%8DMICO+S+PARA+OBTENCION+DE+BIOMASA.pdf>
- MINHACIENDA. (2018). *Boletín No 151 Presupuesto General de la Nación* . Bogotá.

- MINMINAS. (2018). *Informe de gestión 2018*. Obtenido de Gobierno de Colombia; MINMINAS; UPME: www1.upme.gov.co Gobierno de Colombia; MINMINAS; UPME
- Nieves, M., & Vidal, A. (Junio de 2016). *Reporte de Inversion Energetica en Colombia*. Obtenido de International Energy Charter: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Other_Publications/20170103-Reporte_de_Inversion_Energetica_en_Colombia.pdf
- Núñez, C. &. (2016). *Uso de residuos agrícolas para la producción de Biocombustibles en el departamento del Meta*. Corporacion Universitaria del Meta.
- OCDE. (2012). *Perspectivas ambientales de la OCDE hacia 2050 Consecuencias de la inacción - Puntos principales*. Obtenido de <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49884278.pdf>
- Okeh, C. O., Onwosi, O. C., & Odibo C, F. J. (2013). Biogas production from rice husks generated from various rice mills in Ebonyi State, Nigeria. *Sciences Direct*, 1-5.
- Olupot P, C. A., & Walozi, R. (2016). Characterization of rice husk varieties in Uganda for biofuels and their techno-economic feasibility in gasification. *Chemical Engineering Research and Design*, 63-72.
- ONU . (Abril de 2016). *ONU (Organización de Naciones Unidas)*. Obtenido de ONU: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Orhan, Y., & B, D. (2013). *Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review*. *Process Biochemistry*.
- Pabuena M, M., & Pasqualino J, J. (Diciembre de 2014). Potencial de Uso de Biogás en Colombia. *Revista Teknos*, 33.
- Peña, S. (2016). *La biomasa, importancia, características y formas de preparación*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Pérez, G. C. (2010). Evaluación del uso de la cascarilla de arroz como agregado orgánico en morteros de mampostería. *Universidad San Carlos de Guatemala*, 1-133.
- PNUD. (26 de Enero de 2016). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Obtenido de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/librarypage/poverty-reduction/undp-support-to-the-implementation-of-the-2030-agenda.html>
- Quintana, C. (2016). Porquinaza en la alimentación animal. *Revista Lasallista de Investigación*, 5.

- Ramos, G. C. (2011). Petróleo, medio ambiente, cambio climático y seguridad: macondo, otra advertencia mas. *Nomadas, Revista critica de Ciencias Sociales y Juridicas*, 4.
- Revista BP. (2017). *Datos informe BP Statistical Review of World Energy*. Washintong.
- Rodriguez, C. H. (2007). *Demanda Quimica de DQO, por reflujo cerrado y volúmetria*. Bogotá: IDEAM.
- Rojas Reina, C. (2014). *Simulación y modelamiento del proceso anaerobio para la producción de energía con diferentes sustratos*. Hamburgo, Alemania: Universidad Técnica de Hamburgo.
- Rojas, C., Fang, S., & Uhlenhut, F. (2010). Stirring and biomass starter influences the anaerobic digestion of different substrates for biogas production. *Engineering in life sciences*, 339-347.
- Sole, A. C. (2006). *Instrumentación Industrial*. Mexico: Alfaomega.
- Suárez, J. A. (2017). *Análisis del impacto social y económico en los departamentos de Casanare y Meta: Un enfoque*.
- Surendra, K., Andrew, D. T., Samir, G. H., & Khanal, K. (2015). El biogás como fuente de energía sostenible para los países en desarrollo: oportunidades y desafíos.
- TECSOL, & UNAL. (2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. Bogota.
- Tortajada F, G. C. (2001). *Enfermedades asociadas a la polución atmosférica por combustibles*. Valencia, España. Obtenido de <http://www.pehsu.org/az/pdf/fosiles.pdf>
- UNAL. (2016). *Manual de Uso de la Porcinza en la Agricultura*. Medellin UNAL (Universidad Nacional de Colombia): PORKCOLOMBIA.
- UPME. (2014). *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Electrica - PIEC 2016 2020*. Obtenido de http://www1.upme.gov.co/Documents/Libro_PIEC.pdf
- UPME. (2017). Consumo Energético y Regulación en Colombia a 2030, en el contexto de cambios demográficos y mayor oferta de energias renovables. *CIDET*, 1-2.
- Valverde, S. ,, & Monteagudo, J. (2007). *Análisis comprativo de las características fisicoquimicas de la cascarilla de arroz*. Pereira: Scientia et Technica.
- Vargas C, Andrade G, Neslin, D., & Zamora. (2017). *Energía Evolucion*. Obtenido de <https://energiaevolucion.org/fuentesdeenergía/expertos>

- Varnero, T. (2011). *Manual de Biogás*. Obtenido de Gobierno de Chile - Ministerio de Energía - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Global Environment Facility: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Varon, J. (2005). Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de cascarilla de arroz. Colombia.
- Velasquez, L. M. (2013). *Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arroceras cubana para la producción de biogás*. Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Vitali, F., Parmigiani, S., Vccari, M., & Collivignarelli, C. (2016). Agricultural waste as household fuel: Techno-economic assessment of a new rice-husk cookstove for developing countries. *Sciences Direct*, 1-9.
- Wigner, E. P. (2005). Theory of traveling wave optical laser. *Phys. Rev.*, 134, A635-A646.
- Zhang Wanqin, L. Q., & Wu, S. (2014). Anaerobic digestion characteristics of pig manure depending on various growth stages and initial substrate concentrations in a scaled pig farm in Southern China. *Bioresource Technology*, 63-69.

Anexos

Anexo A: Formulas y ejemplos de cálculo para la determinación de las características físico-químicas de los sustratos e inóculos.

Unidades: gramos

- Determinación del porcentaje de Sólidos Totales a 150°C

$$\%ST = \left(\frac{(\text{peso capsula vacia} + \text{masa seca}) - (\text{peso capsula vacia})}{(\text{peso capsula vacia} + \text{masa humeda}) - (\text{peso capsula vacia})} \right) * (100)$$

- Determinación del porcentaje de Sólidos Volátiles a 500°C con respecto al porcentaje de Sólidos Totales

$$\%SV = \left(\left(\frac{(\text{peso crisol vacio} + \text{cenizas}) - (\text{peso crisol vacio})}{(\text{peso crisol vacio} + \text{cenizas}) - (\text{peso crisol vacio} + \text{masa seca})} \right) * (100) + 100 \right)$$

- Determinación del porcentaje de Humedad

$$\%H = 100 - \left(\left(\frac{(\text{peso capsula vacia} + \text{masa seca}) - (\text{peso capsula vacia})}{(\text{masa humeda})} \right) * 100 \right)$$

Con base en lo anterior, se tomó datos de la caracterización de la cascarilla de arroz, usados en una tabla de Excel especificada a continuación, de este modo se realizó el cálculo para cada uno de los sustratos e inóculos

Tabla 1. Determinación de sólidos totales, sólidos volátiles totales, humedad

Sustrato: CASCARILLA	Ubicación: Molino ARROZ ROA		Fecha: 14 de agosto de 2018	Error balanza: 0,001gr
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Peso capsula vacía	88.972	95.448	89.637	88.532
Peso muestra húmeda	2	4.003	6.01	8.001
Peso capsula vacía + peso muestra húmeda	90.972	99.451	95.662	96.344
Peso muestra seca	90.623	98.75	94.65	95.03
SOLIDOS TOTALES (%)	82.55	82.49	83.20	83.18
Promedio			82.86	
Peso crisol vacío	17.913	25.641	25.455	23.799
Peso muestra seca	0.400	0.800	1.214	2.057
Peso crisol vacío + peso muestra seca	18.322	26.45	26.67	25.858
Peso cenizas	17.963	25.769	25.652	24.239
SOLIDOS VOLATILES TOTALES (%)	86.07	81.20	80.65	72.82
Promedio			80.19	
HUMEDAD (%)	17.4	17.5	16.6	18.8
Promedio			17.6	

Nota. Tabulación de los valores obtenidos a partir de la caracterización física de la cascarilla de arroz, esta tabla se presenta a manera de ejemplo de la forma en la que se sintetizó la información para los resultados de cada sustrato. Por Gutiérrez & Ochoa 2019.

Anexo B: Procedimiento para la obtención de las curvas patrón en la identificación de: (Carbono, Nitrógeno, Azufre)

La determinación de la curva patrón para determinar contenido de carbono orgánico total (COT), parte del procedimiento establecido en el Manual de Métodos Normalizados (5220-D) y la Guía IDEAM (TP0086) para determinación de la DQO, descrito a continuación:

Fase 1

A. Preparación previa de material

B. Preparación de solución madre (de 500 mg/lit O₂) disolviendo 0,425 gr de Ftalato seco en agua destilada en un matraz aforado de 1 lit

C. Preparación de diluciones a partir de solución madre

Fase 2

A. Solución de digestión: concentración 0.10 N 4.913gr K₂Cr₂O₇100ml Agua destilada

B. Reactivo H₂SO₄: disolución de 5,5 g de Sulfato de Plata (AgSO₄) por cada Kg de H₂SO₄ (conc), se requiere esperar mínimo 2 días a que el sulfato de plata se disuelva.

Fase 3

A. Digestión: temperatura de digestión de 150 °C por 2 horas en el termoreactor

B. Medición de absorbancia en el espectrofotómetro a 600nm

Fase 4

A. Curva patrón: realizada a partir de la medición de la muestra y se relaciona su absorbancia con la recta obtenida en el espectrofotómetro.

B. Ingresar valor obtenido en la medición de DQO, en la ecuación de la recta de la curva patrón para DQO.

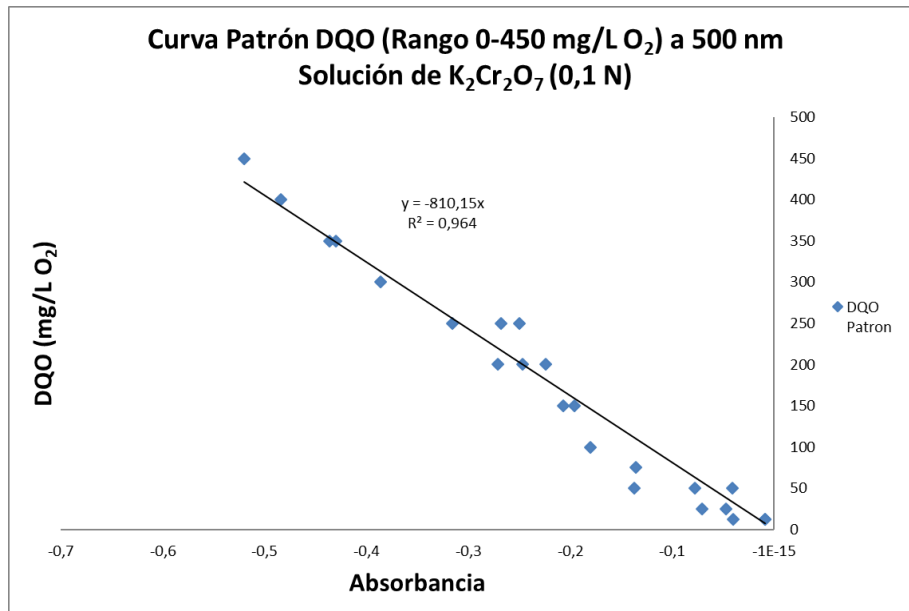


Figura 1. Curva patrón DQO por Gutiérrez & Ochoa 2019.

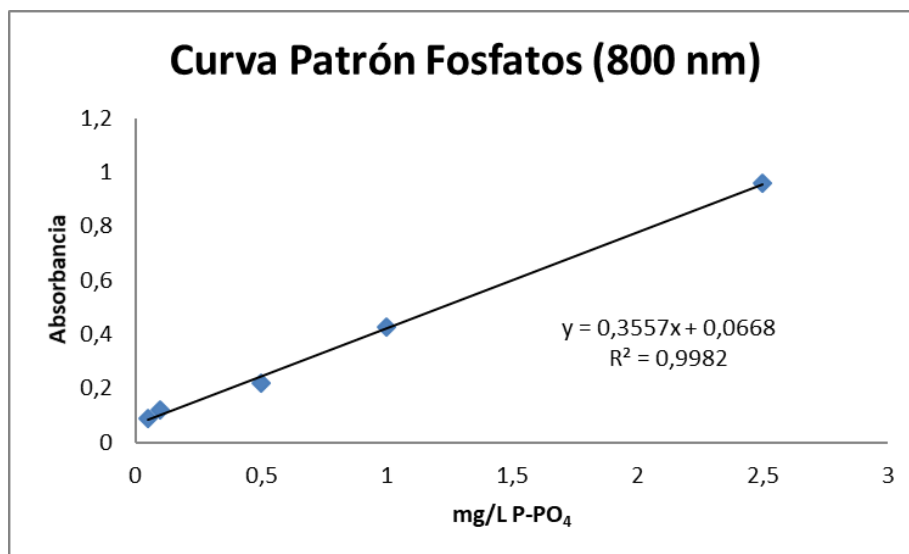


Figura 2. Curva patrón Fosfatos por Gutiérrez & Ochoa 2019

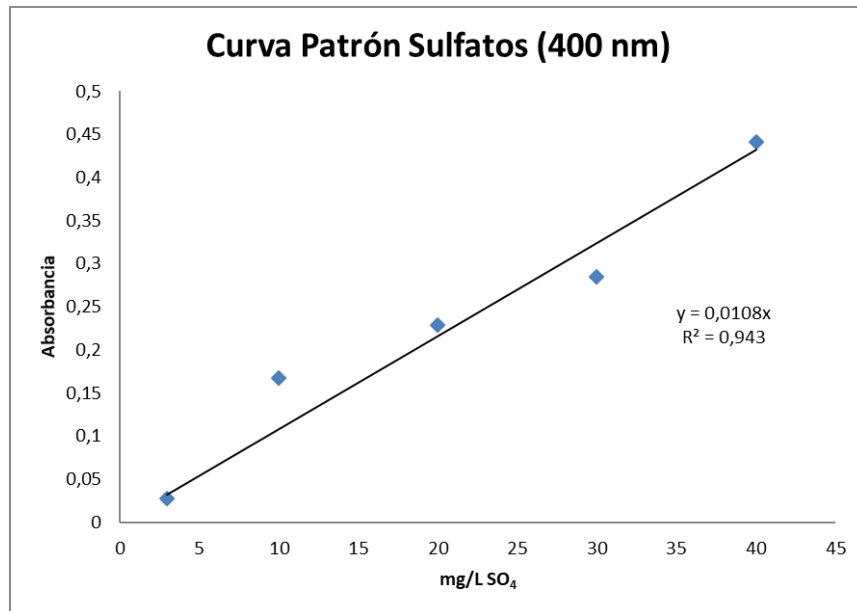


Figura 3. Curva patrón Sulfatos por Gutiérrez & Ochoa 2019

Fase 5: Procedimiento de cálculo para obtención de azufre y fosforo a partir de la determinación de sulfatos y fosfatos.

- **Azufre**



Peso molecular sulfato = $16 + 16 \cdot 4 = 80$

Peso molecular azufre = 16

Fracción molar azufre/sulfato = 0,2

Valor obtenido a partir de la función de la recta, curva patrón sulfatos medidos a (400nm):
4,85070423mg/lit SO₄

Contenido de azufre para la cascarilla: $4,85\text{mg/lit SO}_4 \cdot 0,2 = 0,97\text{mg/lit S}$

- **Fósforo**



Peso molecular fosfato = $31 + 16 \cdot 4 = 95$

Peso molecular fósforo = 31

Fracción molar fósforo/fosfato = 0,326

Valor obtenido a partir de la función de la recta, curva patrón fosfatos medidos a (800nm): 1,363mg/l_{PO4}

Contenido de azufre para la cascarilla: 1,363mg/l_{PO4} * 0,326= 0.444mg/l_P

- Tablas de absorbancia para sustratos del montaje experimental

Tabla 2. Absorbancia cascarilla de arroz.

Parámetro	Absorbancia	Observaciones	Valor (mg/l)
DQO	-0,129		10.449
Nitrógeno	-	10gr titulados	-
Fosfatos	0,555	en 1000ml de	1,3774
Sulfatos	1,788	agua	4,8507

Nota. Resultados de absorbancia para la cascarilla de arroz. Por Gutiérrez & Ochoa 2019.

Tabla 3. Absorbancia excretas.

Parámetro	Absorbancia	Observaciones	Valor (mg/l)
DQO	0,0785	20ml de solución en 1000ml de agua	3.925
Nitrógeno	2,202		3,367
Fosfatos	0,719	50ml de	2
Sulfatos	0,611	solución en 1000ml de agua	1,5352

Nota. Resultados de absorbancia para las excretas porcinas. Por Gutiérrez & Ochoa 2019



Figura 4. Preparación de soluciones de sustratos e inóculos. Por Gutiérrez & Ochoa 2019.

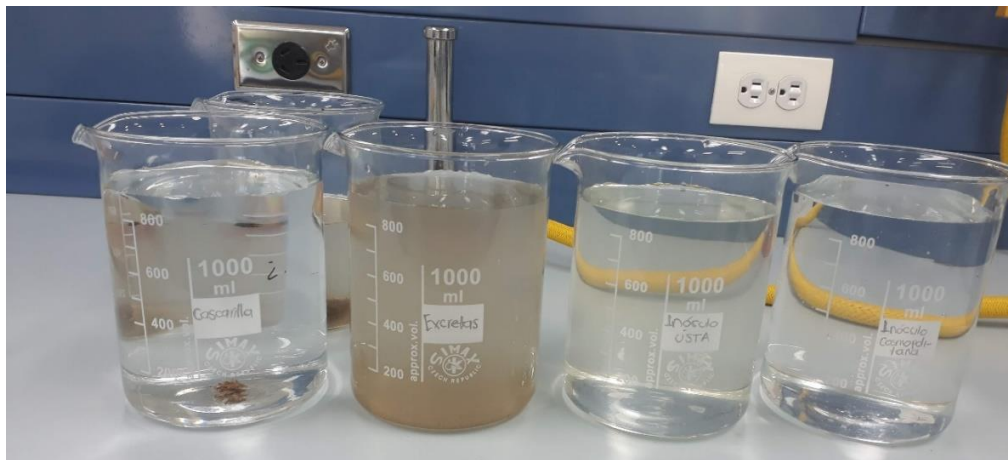


Figura 5. Preparación de diluciones de sustratos e inóculos. Por Gutiérrez & Ochoa 2019.

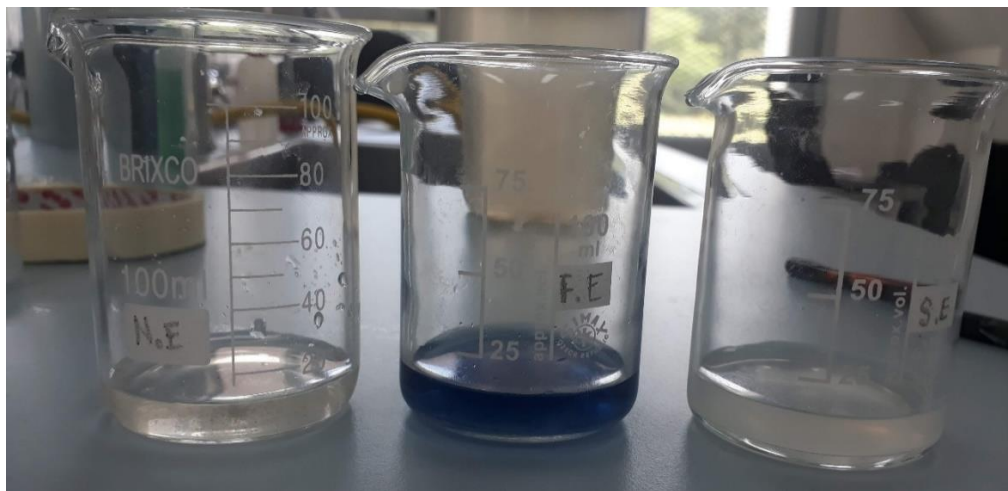


Figura 6. Preparación de diluciones para toma de Nitratos, Fosfatos y Sulfatos. Por Gutiérrez & Ochoa 2019.

Fase 6: ejemplo de cálculo de porcentaje de nutrientes para los sustratos

- Cálculo de COT Cascarilla de arroz

Datos:

COT: 3913.48mg/lt = 3,913g/lt

%ST: 81,80

%SV: 79.80

Solución de cascarilla: 10gr/lt

De 10g de cascarilla de arroz, el 81.80% corresponde a solidos totales, lo que indica una relación de: 8,18grST, teniendo en cuenta que la medición es a partir de 1 litro para todos los cálculos (base

$$8,18 \rightarrow 100\%$$

$$3,913 \rightarrow x$$

$$x = 48,91\%$$

El cálculo anterior se realizó también para obtener la proporción de nutrientes (N, P Y S) de ambos sustratos, teniendo en cuenta la dilución de cada una de las muestras.

Fase 7: ejemplo para el cálculo de la relación DQO/SV de los inóculos

- Inoculo 1

Suponiendo que en 1 litro hay 1000 gramos de inoculo, y asumiendo la densidad como 1g/ml

Datos:

%ST: 0,78

%SV: 29,70

DQO: 1539,286mg/lt

$$SVgInoculo/lt = 1000 * \frac{0,78}{100} * \frac{29,70}{100}$$

$$SVgInoculo/lt = 2,3245$$

$$2324mgSV/lt$$

$$Relación \frac{DQO}{SV} = \frac{1539,28}{2324} = 0,66$$

Anexo C: El presente apartado, describe la normalización de los datos diarios y acumulativos obtenidos de la producción de biogás y metano, evidenciando las fórmulas utilizadas y la síntesis del potencial energético de los sustratos en función de los Sólidos Volátiles correspondiente.

- Fórmula para normalización de los datos de producción de biogás y metano

$$V_o = V_1 * \left(\frac{((P_1 - P_w) * T_o)}{(P_o * T_1)} \right)$$

Donde:

Vo: Volumen de biogás normalizado (ml)

V1: Volumen de biogás medido a temperatura T1 y presión P1

P1: Presión a la que se midió el biogás, (mbar)

Pw: Presión de vapor del agua a la temperatura T1 (mbar), específicamente a 37°C, constante en la incubadora

T1: Temperatura a la que se midió el biogás, temperatura ambiente (K)

Po: Presión normal (1013,25 mbar)

To: Temperatura normal (273,15 K)

- Ejemplo

Datos:

V1: Producción diaria de biogás día 1, reactor No.1 corrida No.1: 4.2ml

T1: Temperatura a la que se midió el biogás día 1: 26°C equivalente a 299,15K

P1: Presión a la que se midió el biogás día 1: 1015Hpa equivalente a 1015mbar

Pw: Presión de vapor del agua a la temperatura T1 (mbar), específicamente a 37°C, constante en la incubadora: 62,823hPA equivalente a 62,823mbar

Po: Presión normal (1013,25 mbar)

To: Temperatura normal (273,15 K)

$$V_o = 4,2 * \left(\frac{((1015 - 62,823) * 273,15)}{(1013,25 * 299,15)} \right)$$

$$V_o = 3.477ml$$

La masa del sustrato adicionada al reactor en términos de SV, se determinó mediante la siguiente formula:

$$M_s = ((M_a * \%ST) * (\%SV))$$

Donde:

Ms = Masa de sustrato adicionada al reactor en términos de sólidos volátiles (grSV).

Ma = Masa de sustrato adicionada

%ST = Porcentaje de Sólidos Totales de acuerdo a la caracterización del sustrato

%SV = Porcentaje de Sólidos Volátiles con respecto a Sólidos totales, de acuerdo a la caracterización del sustrato

Para obtener el potencial energético de cada sustrato, se utilizó la fórmula descrita a continuación:

- Fórmula para la obtención del potencial energético de cada sustrato.

$$Pe = \frac{VB}{Ms}$$

Donde:

VB: Volumen de biogás acumulado durante el tiempo de digestión (ml)

Ms: Masa de sustrato adicionada al reactor en términos de sólidos volátiles (grSV).

- Ejemplo: Los datos utilizados corresponden a la obtención del potencial energético de la cascarilla de arroz en la corrida 1.

Datos:

VB: 73,2654ml corrida 1 dato acumulativo

Ms: 0,65grSV

$$Pe = \frac{73,2654}{0,65} = 112,7131 \text{ ml/grSV}$$

Anexo D: Datos de producción de biogás, metano, variables ambientales y mapa de puntos de muestreo.

- **Corrida 1**

Tabla 4. Datos diarios normalizados de producción de biogás y metano.

<i>Días de medición</i>	Inóculo (ml)		Inóculo + Excretas (ml/grSV)		Inóculo + Excretas + Cascarilla de arroz (ml/grSV)	
	Biogás	Metano	Biogás	Metano	Biogás	Metano
<i>0</i>	0	0	0	0	0	0
<i>1</i>	3,478	0	0	0,657	0,595	0
<i>2</i>	3,805	4,053	0	0,710	0,643	0,594
<i>3</i>	3,892	4,306	1,301	1,328	1,201	0,631
<i>4</i>	4,057	4,554	1,328	1,382	1,250	1,201
<i>5</i>	8,280	7,618	1,368	1,395	1,262	1,250
<i>6</i>	8,271	8,106	1,340	1,407	1,273	1,261
<i>7</i>	8,694	4,637	2,079	1,382	1,250	1,286
<i>8</i>	8,851	0	2,667	2,050	1,855	1,806
<i>9</i>	8,611	0	2,710	3,568	3,228	1,857
<i>10</i>	12,682	0	0	2,041	1,847	0
<i>11</i>	0	0	0	2,669	2,415	0
<i>12</i>	0	0	0	2,707	2,449	0
<i>13</i>	0	0	0	1,999	1,808	0
<i>14</i>	0	0	0	0	0	0
<i>15</i>	0	0	0	1,367	1,237	0

Nota. Datos de producción diaria de la corrida 1, normalizados mediante las ecuaciones descritas en la fase metodológica; esta tabla se presenta a manera de ejemplo de la síntesis de los datos para su posterior graficación. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

Tabla 5. Datos acumulativos normalizados de producción de biogás y metano.

Días de medición	Inóculo (ml)		Inóculo + Excretas (ml/grSV)		Inóculo + Excretas + Cascarilla de arroz (ml/grSV)	
	Biogás	Metano	Biogás	Metano	Biogás	Metano
0	0	0	0	0	0	0
1	3,478	0	0	0	0,595	0
2	7,283	4,053	0	1,902	1,237	0,594
3	11,174	8,359	8,032	5,463	2,439	1,225
4	15,232	12,913	16,229	10,100	3,689	2,427
5	23,512	20,531	24,675	14,985	4,951	3,677
6	31,783	28,637	32,946	20,113	6,224	4,938
7	40,477	33,274	45,781	26,324	7,474	6,224

Tabla 5. (Continuación).

8	49,328	33,274	62,241	34,430	9,329	8,030
9	57,939	33,274	78,967	42,875	12,557	9,887
10	70,621	33,274	78,967	42,875	14,404	9,887
11	70,621	33,274	78,967	42,875	16,819	9,887
12	70,621	33,274	78,967	42,875	19,268	9,887
13	70,621	33,274	78,967	42,875	21,076	9,887
14	70,621	33,274	78,967	42,875	21,076	9,887
15	70,621	33,274	78,967	42,875	22,313	9,887

Nota. Datos de producción acumulativa de la corrida 1, normalizados mediante las ecuaciones descritas en la fase metodológica; esta tabla se presenta a manera de ejemplo de la síntesis de los datos para su posterior graficación. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

Tabla 6. Variables ambientales diarias – estación meteorológica Vanguardia.

Presión(mbar)	Temperatura (K)
1015	299,15
1014	298,15
1015	300,15
1015	299,15
1015	298,15
1014	301,15
1015	299,15
1014	298,15
1015	299,15
1016	297,15
1015	298,15
1014	302,15
1015	299,15
1015	300,15
1014	298,15

Nota. Datos de variables ambientales, tomados de la estación meteorológica de Vanguardia en Villavicencio; los cuales fueron tomados durante el tiempo de medición de la corrida 1. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

- Corrida 2

Tabla 7. Datos diarios normalizados de producción de biogás y metano.

Días de medición	Inóculo (ml)		Inóculo + Excretas (ml/grSV)		Inóculo + Excretas + Cascarilla de arroz (ml/grSV)	
	Biogás	Metano	Biogás	Metano	Biogás	Metano
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0,990	0	0	0,334	0,150	0,173
3	1,156	1,486	0,388	0	0,219	0,185
4	0	2,889	0,321	0,388	0,289	0,415
5	2,070	0	0,470	0,470	0,394	0,521
6	0	0	0	0	0	0
7	1,983	0	1,017	1,392	1,444	1,560
8	0	0	0,643	0,831	0,752	0
9	0	0	0	0,428	0,485	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0

Nota. Datos de producción diaria de la corrida 2, normalizados mediante las ecuaciones descritas en la fase metodológica; esta tabla se presenta a manera de ejemplo de la síntesis de los datos para su posterior graficación. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

Tabla 8. Datos acumulativos normalizados de producción de biogás y metano.

Días de medición	Inóculo (ml)		Inóculo + Excretas (ml/grSV)		Inóculo + Excretas + Cascarilla de arroz (ml/grSV)	
	Biogás	Metano	Biogás	Metano	Biogás	Metano
0	0	0	0	0	0	-
1	0	0	0	0	0	-
2	0,990	0	0	0,334	0,150	-
3	2,146	1,486	0,388	0,334	0,369	-
4	2,146	4,375	0,709	0,722	0,658	-
Tabla 8. (Continuación).						
5	4,216	4,375	1,178	1,192	1,051	-
6	4,216	4,375	1,178	1,192	1,051	-
7	6,199	4,375	2,196	2,584	2,496	-

8	6,199	4,375	2,839	3,415	3,247	-
9	6,199	4,375	2,839	3,843	3,733	-
10	6,199	4,375	2,839	3,843	3,733	-
11	6,199	4,375	2,839	3,843	3,733	-
12	6,199	4,375	2,839	3,843	3,733	-
13	6,199	4,375	2,839	3,843	3,733	-
14	6,199	4,375	2,839	3,843	3,733	-
15	6,199	4,375	2,839	3,843	3,733	-

Nota. Datos de producción acumulativa de la corrida 2, normalizados mediante las ecuaciones descritas en la fase metodológica; esta tabla se presenta a manera de ejemplo de la síntesis de los datos para su posterior graficación. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

Tabla 9. Variables ambientales diarias - estación meteorológica Vanguardia

Presión(mbar)	Temperatura (K)	Humedad relativa (%)
1013	305,15	46
1012	307,15	36
1012	305,15	43
1012	306,15	44
1015	304,15	34
1013	306,15	42
1013	307,15	44
1014	306,15	43
1013	305,15	37
1012	304,15	44
1013	306,15	43
1012	304,15	44
1014	303,15	45
1013	306,15	46
1014	305,15	42

Nota. Datos de variables ambientales, tomados de la estación meteorológica de Vanguardia en Villavicencio; los cuales fueron tomados durante el tiempo de medición de la corrida 2.por Gutierrez & Ochoa 2019.

- Corrida 3

Tabla 10. Datos diarios normalizados de producción de biogás y metano.

Días de medición	Inóculo (ml)		Inóculo + Excretas (ml/grSV)		Inóculo + Excretas + Cascarilla de arroz (ml/grSV)	
	Biogás	Metano	Biogás	Metano	Biogás	Metano
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	8,511	6,048	1,232	0	2,149	1,641
3	10,329	8,511	1,499	1,124	2,287	1,768
4	17,010	3,734	2,594	0,430	3,168	1,861
5	29,560	5,962	2,039	1,368	2,716	1,931
6	23,053	17,600	2,570	1,486	2,488	1,969
7	10,131	7,825	1,148	0,587	2,776	1,509
8	7,594	0	1,351	0,441	3,194	0
9	4,384	0	0	0,576	3,635	1,335
10	0	0	0,832	0,282	1,517	0,828
11	3,970	1,902	0,683	0	1,081	0
12	2,987	0	0	0	0,776	0,563
13	0	0	0	0,148	0,563	0
14	0	0	0,429	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0

Nota. Datos de producción diaria de la corrida 3, normalizados mediante las ecuaciones descritas en la fase metodológica; esta tabla se presenta a manera de ejemplo de la síntesis de los datos para su posterior graficación. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

Tabla 11. Datos acumulativos normalizados de producción de biogás y metano

Días de medición	Inóculo (ml)		Inóculo + Excretas (ml/grSV)		Inóculo + Excretas + Cascarilla de arroz (ml/grSV)	
	Biogás	Metano	Biogás	Metano	Biogás	Metano
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	8,511	6,048	1,232	0	2,149	1,641
3	18,839	14,559	2,731	1,124	4,436	3,409
4	35,849	18,293	5,325	1,555	7,604	5,269
Tabla 11. (Continuación)						
5	65,410	24,255	7,364	2,923	10,320	7,200
6	88,463	41,854	9,934	4,409	12,808	9,169
7	98,594	49,679	11,082	4,996	15,583	10,679
8	106,188	49,679	12,432	5,437	18,777	10,679

9	110,572	49,679	12,432	6,013	22,412	12,014
10	110,572	49,679	13,264	6,295	23,930	12,841
11	114,542	51,582	13,948	6,295	25,011	12,841
12	117,529	51,582	13,948	6,295	25,787	13,405
13	117,529	51,582	13,948	6,443	26,350	13,405
14	117,529	51,582	14,377	6,443	26,350	13,405
15	117,529	51,582	14,377	6,443	26,350	13,405

Nota. Datos de producción acumulativa de la corrida 3, normalizados mediante las ecuaciones descritas en la fase metodológica; esta tabla se presenta a manera de ejemplo de la síntesis de los datos para su posterior graficación. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

Tabla 12. Variables ambientales diarias - estación meteorológica Vanguardia

Presión(mbar)	Temperatura (K)	Humedad relativa (%)
1013	307,15	70
1013	304,15	78
1013	309,15	59
1017	306,15	74
1015	307,15	72
1013	308,15	73
1010	312,15	44
1012	312,15	44
1014	309,15	65
1015	307,15	69
1014	308,15	78
1017	306,15	65
1016	307,15	83
1015	308,15	76
1014	307,15	82

Nota. Datos de variables ambientales, tomados de la estación meteorológica de Vanguardia en Villavicencio; los cuales fueron tomados durante el tiempo de medición de la corrida 3. Por Gutierrez & Ochoa 2019.

- Corrida 4

Tabla 15. Variables ambientales diarias - estación meteorológica Vanguardia

Presión(mbar)	Temperatura (K)	Humedad relativa (%)
1018	302,15	100
1015	306,15	79
1014	309,15	55
1015	306,15	74
1011	307,15	70
1014	305,15	61
1010	305,15	44
1014	306,15	68
1013	305,15	72
1011	305,15	79
1014	306,15	78
1017	305,15	79
1016	306,15	83
1015	308,15	76
1014	307,15	82

Nota. Datos de variables ambientales, tomados de la estación meteorológica de Vanguardia en Villavicencio; los cuales fueron tomados durante el tiempo de medición de la corrida 4. Por Gutiérrez & Ochoa 2019.

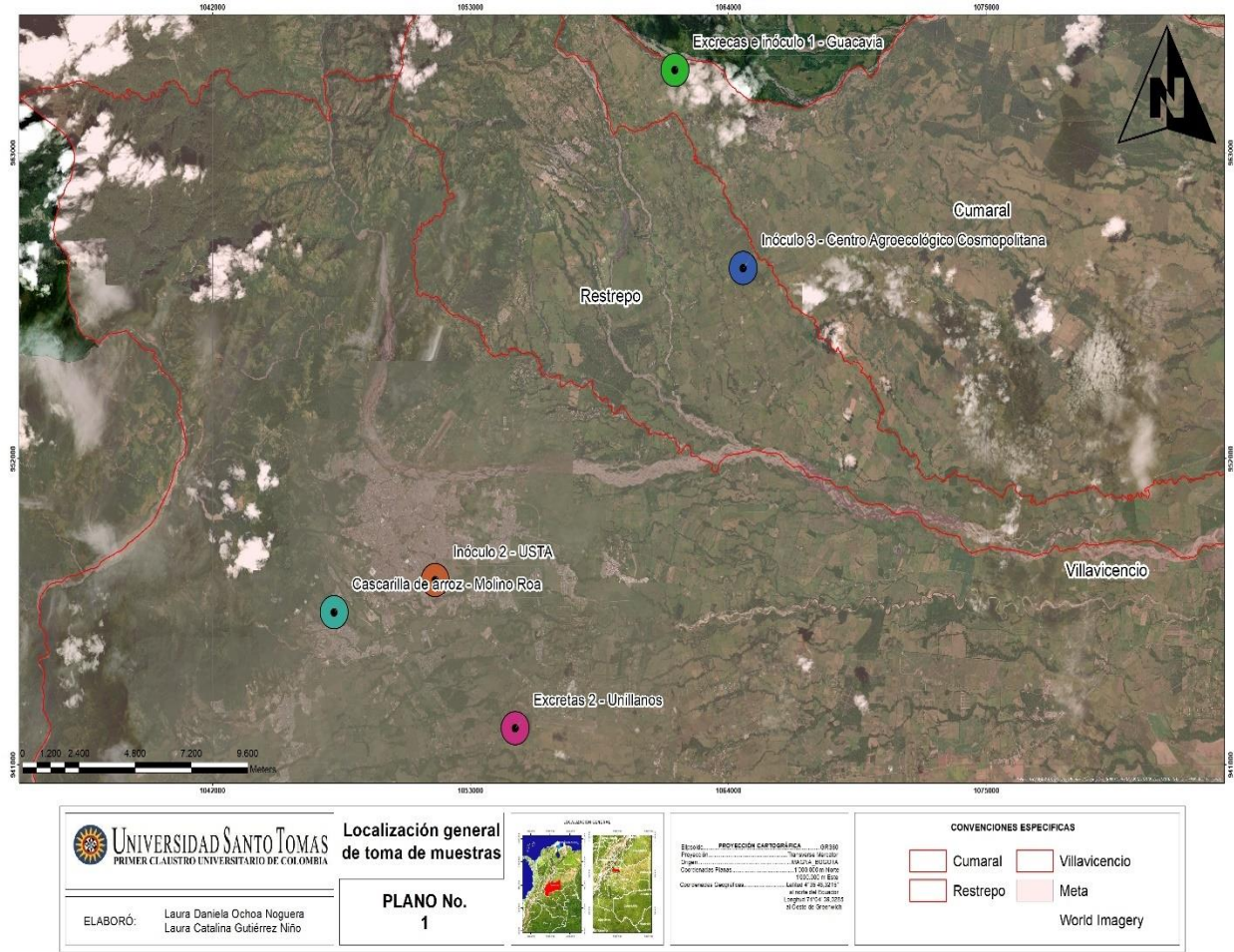


Figura 7. Ubicación geográfica, puntos de toma de muestras. Por Gutierrez & Ochoa 2019.