

**DETERMINACIÓN DE LA OFERTA DE BIOMASA RESIDUAL DEL
MUNICIPIO DE BETULIA-SANTANDER Y USO POTENCIAL PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOGAS**

WENDI YESENIA MEDINA MORALES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2020

**DETERMINACIÓN DE LA OFERTA DE BIOMASA RESIDUAL DEL
MUNICIPIO DE BETULIA - SANTANDER Y USO POTENCIAL PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOGAS**

WENDI YESENIA MEDINA MORALES

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Químico**

Director

María Paola Maradei García

Ing. Químico Ph.D.

Codirector

Liliana del Pilar Castro Molano

Ing. Químico Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2020

DEDICATORIA

Gracias a Dios por darme la vida, por siempre acompañarme y guiar mi camino, por colocar personas maravillosas que de una u otra forma contribuyeron en este logro.

A los profesores que hicieron parte de mi formación profesional y personal durante toda la carrera.

A mis padres, Jesús Martín y María Del Carmen, gracias por su apoyo incondicional, por su amor, oración, comprensión y humildad hicieron de mí una persona llena de muchos valores capaz de afrontar los grandes retos de la vida.

A mis hermanos, Yeison, Wilmer, Jesús gracias por apoyo incondicional que a pesar de la distancia siempre están para mí, sacándome una sonrisa con cada ocurrencia.

A mis amigos de asuntos varios IQ que me acompañaron en mi camino gracias por brindarme un espacio en sus vidas, brindándonos amistad y apoyo en los momentos difíciles.

A mi segunda familia, la selección femenina de futsal UIS por darme oportunidad de llevar en alto el nombre de la universidad en cada uno de los torneos. Por permitirme conocer excelentes personas con las que conviví, aprendí, compartí y viví experiencias maravillosas en cada uno de nuestros viajes y que con el tiempo se han fortalecido grandes lazos de amistad.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora María Paola Maradei García gracias por su apoyo, confianza, paciencia, disposición y constante orientación en la ejecución del proyecto.

A la profesora Liliana Del Pilar Castro Molano por sus aportes y conocimientos en los procesos de digestión Anaeróbica.

A la empresa Gematech S.A.S y a la Universidad de Northumbria por su apoyo, colaboración y amplio conocimiento del corregimiento de San Bernardo en Betulia-Santander.

A cada uno de los integrantes del grupo de investigación INTERFASE por su colaboración incondicional en el laboratorio.

A la Universidad Industrial de Santander y profesores por su constante contribución en el proceso de aprendizaje durante toda la carrera.

ABREVIATURAS

DA: Digestión anaeróbica

CoDA: Co-digestión anaeróbica

PCI: Poder calorífico inferior

PE: Potencial energético

PBM: Potencial de biometanización

EBF: Estiércol bovino fresco

EE: Estiércol equino

LC: Lixiviado de cacao

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

SF: Sólidos fijos

AGV: Ácidos grasos

AT: Alcalinidad total

RIS: Relación inóculo/sustrato

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.2 GENERALIDADES	21
2.3 MODELO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO (PE).....	24
2.4 MODELO DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM).....	26
3. METODOLOGÍA.....	29
3.1 FASE I: DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL	29
3.1.1 Identificación y cuantificación de la biomasa residual en la zona de estudio:	29
3.1.2 Caracterización de la biomasa residual de cultivos de banano, aguacate, cacao y maracuyá:	30
3.2 FASE II: POTENCIALES ENERGÉTICOS	31
3.2.1 Determinación del potencial energético (PE):	31
3.2.2 Determinación del potencial de biometanización (PBM):	32
3.2.3 Recolección y Caracterización de los sustratos e inóculo:	32
3.2.4 Pruebas experimentales de potencial de biometanización de las mezclas (PBM):.....	33
3.2.5 Determinación de la sinergia de la Co-digestión:.....	35
4. RESULTADOS	37

4.1 Disponibilidad de biomasa residual en la zona.....	37
4.1.1 Caracterización de la biomasa residual generada por el cultivo de maracuyá:	38
4.2 Determinación del Potencial energético (PE)	39
4.3 Potencial de biometanización (PBM).....	40
4.3.1 Caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo:	41
4.3.2 PBM de la mono digestión del inóculo (digerido de EB) con los sustratos (EBF, EE, LC):.....	42
4.3.3 PBM de la Co-digestión del inóculo (digerido EBF) con los sustratos (EBF, EE, LC):	44
4.3.4 Análisis de sinergia para los sustratos en la Co-digestión:	47
4.4 Aplicación sobre un caso de estudio	48
5. CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS.....	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los residuos de acuerdo a su origen.	23
Tabla 2. Diseño de experimentos de la co-digestión.	34
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual del cultivo de maracuyá.	38
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo.	41
Tabla 5. Valores de pH al inicio y final del PBM de la monodigestión.	42
Tabla 6. Resultados finales de PMB de la Mono digestión de los sustratos EBF, EE, LC.	44
Tabla 7. Valores de pH al inicio y final del PMB de la co-digestión.	44
Tabla 8. Potencial de biometanización y Sinergia de la co-digestión.	47
Tabla 9. Producción de biogás teórica en la finca 12 con base en el diseño de mezcla C2.	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Transformaciones energéticas de la biomasa.	23
Figura 2. Trayectoria del recorrido realizado en la zona de estudio; Fuente: vista satelital de la herramienta Google Maps.	29
Figura 3. Biomasa residual en la zona de estudio.	37
Figura 4. Potencial energético de la biomasa residual agrícola; Fuente: vista satelital de la herramienta Google Maps.....	39
Figura 5. Potencial teórico de biometanización de la biomasa residual agrícola; Fuente: vista satelital de la herramienta Google Maps.....	40
Figura 6. Potencial de biometanización para la mono digestión del inóculo con los sustratos EBF, EE, LC.....	43
Figura 7. Potencial de biometanización: digestión binaria.	45
Figura 8. Potencial de biometanización: digestión ternaria.	46

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Formatos de las plantillas aplicadas en la zona de estudio.	52
ANEXO B. Recopilación de las Caracterizaciones de las propiedades fisicoquímicas de las biomasas presentes en la zona de estudio.....	59
ANEXO C. Medición de pH.....	60
ANEXO D. Ácidos grasos volátiles (AGV) y Alcalinidad total (AT).....	61
ANEXO E. Base de datos recolectada en la zona de estudio.....	62
ANEXO F. Potencial energético en el área de estudio.	64
ANEXO G. Determinación del volumen de biogás por el método de desplazamiento alcalino.....	65
ANEXO H. Proceso seguido en la determinación del PBM.	66
ANEXO I. Balance de masa material lignocelulósico.....	67

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE LA OFERTA DE BIOMASA RESIDUAL DEL MUNICIPIO DE BETULIA-SANTANDER Y USO POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS*

AUTOR: WENDI YESENIA MEDINA MORALES**

PALABRAS CLAVE: BIOMASA RESIDUAL, BIOGÁS, POTENCIAL ENERGÉTICO, POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN.

DESCRIPCIÓN: En el corregimiento de San Bernardo en Betulia (Santander) actualmente se desechan grandes cantidades de biomasa residual provenientes de sistemas de producción agrícola y pecuario los cuales terminan mayoritariamente en vertederos o son eliminados mediante quemas abiertas al ambiente; generando en consecuencia, riesgos para la salud humana y problemas de contaminación al medio ambiente; sin embargo, esos residuos, al utilizar un tratamiento adecuado como la digestión anaeróbica (DA) permite el tratamiento de residuos, disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabonos) y al mismo tiempo, producir energía gaseosa (biogás). Este biogás puede ser capturado y usado como combustible para la cocción de alimentos, para la generación de calor o para la producción de electricidad. En el presente trabajo de investigación se identificaron las biomásas residuales provenientes de 6 cultivos característicos de la región y algunos sistemas de producción pecuaria proporcionando información detallada que contribuye a determinar sus potenciales energéticos de biometanización como primer paso en la implementación de tecnologías para la consecución de gas y electricidad en las zonas no interconectadas.

Se encontró que en su mayoría las biomásas residuales corresponden a tallos y hojas productos de las podas realizadas en los cultivos de banano, aguacate, cítricos, cacao y maracuyá; presentando un potencial energético total de la zona de 1270 GJ/año. A su vez, se determinó el potencial de biometanización de una mezcla de sustratos característicos de la zona (EBF, EE, LC) obteniéndose la mayor producción acumulada de metano para la mezcla C2 (EBF:1/3, EE:2/3, LC:1/3) con una producción de 0,243 m³CH₄/kg SV adicionados.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química. Directora Doctora en química María Paola Maradei García. Codirector doctora en ingeniería química Liliana del Pilar Castro Molano.

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF THE RESIDUAL BIOMASS OFFER OF THE MUNICIPALITY OF BETULIA-SANTANDER AND POTENTIAL USE FOR THE PRODUCTION OF BIOGAS*.

AUTHOR: WENDI YESENIA MEDINA MORALES **

KEY WORDS: RESIDUAL BIOMASS, BIOGAS, ENERGY POTENTIAL, BIOMETANIZATION POTENTIAL.

DESCRIPTION: In the corregimiento of San Bernardo in Betulia (Santander), large quantities of residual biomass from agricultural and livestock production systems are currently discarded, which mostly end up in landfills or are eliminated by burning open to the environment; generating, consequently, risks for human health and problems of pollution to the environment; However, these residues, by using an appropriate treatment such as anaerobic digestion (DA), allow the treatment of waste, decrease the amount of contaminating organic matter, stabilize it (bioabonos) and at the same time, produce gaseous energy (biogas). This biogas can be captured and used as fuel for cooking food, for heat generation or for the production of electricity. In the present research work, the residual biomass from 6 characteristic crops of the region and some livestock production systems were identified, providing detailed information that contributes to determine their biomethanization energy potentials as the first step in the implementation of technologies for gas procurement and electricity in non-interconnected areas.

It was found that mostly residual biomass corresponds to stems and leaves products of pruning carried out in banana, avocado, citrus, cocoa and passion fruit crops; presenting a total energy potential of the area of 1270 GJ / year. In turn, the biomethanization potential of a mixture of substrates characteristic of the area (EBF, EE, LC) was determined, obtaining the highest cumulative methane production for the C2 mixture (EBF: 1/3, EE: 2/3, LC: 1/3) with a production of 0.243 m³CH₄ / kg SV added.

* Degree work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of chemical engineering. Director PhD in chemistry María Paola Maradei García. Co-director PhD in chemical engineering Liliana Del Pilar Castro Molano.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, Colombia es considerado uno de los países más productivos y competitivos a nivel mundial, gracias a que cuenta con amplia disponibilidad de tierras destinadas a la actividad agrícola, espacios para mejorar la productividad, oferta de recursos naturales como flora y biodiversidad y condiciones climáticas tropicales que permiten la producción de alimentos durante todo el año.

El sector agropecuario en Colombia tiene una larga tradición; la última encuesta nacional realizada por el DANE (2019) y aplicada a 22 departamentos, muestran que el país en el primer semestre de 2019, el área total sembrada por grupo de cultivos en el país fue de 4.329.016 hectáreas¹

¹ DEPARTAMENTO NACIONAL AGROPECUARIO. Boletín Técnico. Primer semestre 2019. 2019-2020.p.4.[en línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2019/boletin_ena_209-1.pdf

Por otra parte, La producción total registrada fue de 31.144.905 toneladas de las cuales 21.946.605 toneladas corresponden al grupo de agroindustriales (70,5%), 3.261.501 toneladas a tubérculos y plátano (10,5%) y 2.911.827 toneladas de frutales (9,3%). La producción de cereales, llegó a 1.652.859 toneladas (5,3%) y las hortalizas, verduras y legumbres 1.372.113 toneladas (4,4%)¹.

Actualmente, INTERFASE junto con la empresa GEMATEC SAS y la universidad de Northumbria de Inglaterra, realizan estudios que buscan la generación de energía mediante la valorización de residuos de cosecha en el corregimiento de San Bernardo; zona rural del municipio de Betulia (Santander).

¹ Ibíd.p.9.

El municipio de Betulia es un municipio netamente agrícola que, debido a su ubicación geográfica en la cordillera oriental, cuenta con un amplio rango de elevación (Latitud: 6.9, Longitud: -73.283 6° 54' 0" Norte, 73° 16' 59" Oeste) y, por tanto, presenta una gran variedad de pisos térmicos que favorecen el cultivo de una gran variedad de plantas tales como café, tabaco, cacao, hortalizas, frutales y algunos sistemas de producción pecuaria como bovino, porcino, avícola y equino³. Esto conlleva a la generación de grandes cantidades de residuos o biomásas de cosecha, postcosecha y residuos de producción animal, los cuales terminan mayoritariamente en vertederos o son eliminados mediante quemas abiertas al ambiente; generando en consecuencia, riesgos para la salud humana y problemas de contaminación al medio ambiente.

Por otro lado, la dificultad que existe en las áreas rurales de Colombia para acceder a la energía y asociada a la baja inversión estatal en el mejoramiento de la infraestructura de dichas zonas, hace que no se generen proyectos de construcción y/o ampliación de redes eléctrica y de gas natural para uso de los pobladores⁴. A causa de todo esto, se buscan otras formas de abastecimiento energético como lo es la valorización de residuos agrícolas y pecuarios disponibles en la zona de estudio. Estudios realizados por el grupo de investigación INTERFASE han evidenciado la viabilidad de la utilización de dichos residuos para la producción de energía⁵⁶⁷⁸.

³ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL. Censo Agropecuario. Esquema de ordenamiento territorial del municipio de Betulia.2002. p.79.

⁴ MARÍN,J. BOTERO,C., MORENO,W.,HERNÁNDEZ,R. Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia revisión junio de 2016. UPME, p. 55.

⁵ GONZÁLEZ, M., ROA, J. Caracterización fisicoquímica de biomasa agrícola representativa en Santander: papa, yuca, mora, papaya, cebolla junca.Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2013.

⁶ GÓMEZ, DAND., PARRA J., Caracterización fisicoquímica de residuos agrícolas en Santander: cacao, cítricos, fique y tomate. Tesis de pregrado.Universidad Industrial Santander.2013.

La producción de energía a partir de dichos residuos agropecuarios se considera como alternativa viable para suplir la carencia del servicio de energía eléctrica y de gas en algunas viviendas rurales del corregimiento de San Bernardo. Existen diferentes procesos que permiten la valorización energética de los residuos agropecuarios, la escogencia de uno u otro depende del tipo de energía que se desea generar.

La digestión anaerobia (AD) se ha posicionado como un proceso de producción de energía renovable viable en zonas rurales no interconectadas; como es el caso del corregimiento de San Bernardo. Durante la digestión anaeróbica de la biomasa, se genera el biogás, el cual, está constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este biogás puede ser capturado y usado como combustible para la cocción de alimentos, para la generación de calor o para la producción de electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabonos) y al mismo tiempo, producir energía gaseosa (biogás)⁹. Esta tecnología se lleva a cabo en reactores denominados biodigestores (BDG), los cuales se caracterizan por su bajo costo de construcción y fácil instalación¹⁰.

Por todo lo expuesto anteriormente, el objetivo de este trabajo de investigación fue identificar las biomásas residuales (agrícola y pecuaria) producida en el corregimiento de San Bernardo (Betulia) con el fin de determinar su oferta y sus potenciales energéticos de biometanización como

⁷ SOLANO, A., MENDOZA, C., Caracterización de los residuos de cultivos agrícolas de aguacate, arracacha, frijol, guayaba y piña producidos en Santander, Colombia. Pregrado presencial. Universidad Industrial Santander.2013.

⁸ CASTRO L., ESCALANTE, H., JAIMES, E., Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. Bioresour Technol., vol. 239, pp. 311–317, 2017.

⁹ ARIZA,C., TONCEL, L. BLANCHAR,J., Biodigestión anaerobia como alternativa energética para reducir el consumo de leña en las zonas rurales consumption of firewood in rural areas. Rev. Espac., vol. 39, p. 23, 2018.

¹⁰ MORENO, M., Manual de biogás de Chile Remoción Barreras para la Electríf. Rural con Energías Renov., vol. 64, no. 6, p. 145, 2011.

primer paso en la implementación de tecnologías para la consecución de gas y electricidad en las zonas no interconectadas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la oferta de biomasa residual del corregimiento de San Bernardo (municipio de Betulia) y su potencial como fuente de energía para la producción de biogás.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la disponibilidad de residuos de postcosecha, así como otros residuos generados por actividades pecuarias que estén disponibles en el área de estudio.
- Cuantificar el potencial de biometanización de los sustratos y la actividad metanogénica específica del inóculo seleccionados previamente.

2. MARCO TEÓRICO

2.2 GENERALIDADES

El agotamiento de los recursos fósiles ha ocasionado la búsqueda de nuevas fuentes de energía, entre ellas, la biomasa ha despertado gran interés porque es renovable, potencialmente sostenible y su uso es relativamente amigable con el ambiente. Además, esta fuente de generación de energía requiere menos inversión de capital y costos por unidad de producción en comparación con otras fuentes como la hidráulica, la solar y la eólica.

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica¹¹.

La biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales. Algunos ejemplos de biomasa son los residuos de las cosechas, las podas de zonas, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado¹². Todos presentan grandes ventajas en su utilización para reducir la contaminación, reducir el espacio en vertederos, mitigar las emisiones de CO₂ y contribuir al desarrollo socioeconómico de las áreas rurales. Además de crear posibilidades de utilización de tierras de rastrojo con cultivos energéticos favoreciendo el aprovechamiento de residuos agrícolas, pecuarios y forestales¹³. La conversión de la biomasa en energía se lleva a cabo por procesos térmicos y biológicos tal como se muestra en la

¹¹ ESCALANTE, H., JANNETH, O., JOSUÉ, H. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. p. 5, 2010.

¹² *Ibíd.* p. 22.

¹³ GARRIDO, S., Centrales termoeléctricas de biomasa. *Renovetec*, vol. 1, 2012. [en línea]. Disponible en: <http://www.renovetec.com/165-centrales-termoelectricas-de-biomasa>.

Figura 1. La escogencia de uno u otro depende del tipo de energía a generar, biocombustibles líquidos, gaseosos, electricidad y biogás.

La digestión anaeróbica (DA) consiste en la oxidación biológica de la materia orgánica mediante microorganismos específicos en ausencia de oxígeno molecular y se compone de cuatro etapas esenciales, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Como consecuencia de este proceso, la materia orgánica se transforma por un lado en productos estables e inertes y, por el otro, en biogás (principalmente metano y dióxido de carbono); ambos productos con un valor energético considerable¹⁴. El proceso microbiológico no sólo requiere fuentes de carbono y nitrógeno sino también sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Generalmente la materia orgánica como los estiércoles y lodos cloacales presentan dichos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, cuando se emplean ciertos desechos industriales puede ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico¹⁵.

¹⁴ GARCIA-AMADO, K., Codigestión Anaeróbica De Estiércol Y Lodos De Depuradora Para Produccion De Biogás. Tesis de pregrado. *Universidad. Cádiz*, p. 76, 2009.

¹⁵ MORENO, M., Manual de biogás de Chile Remoción Barreras para la Electríf. Rural con Energías Renov., vol. 64, no. 6, p. 145, 2011.

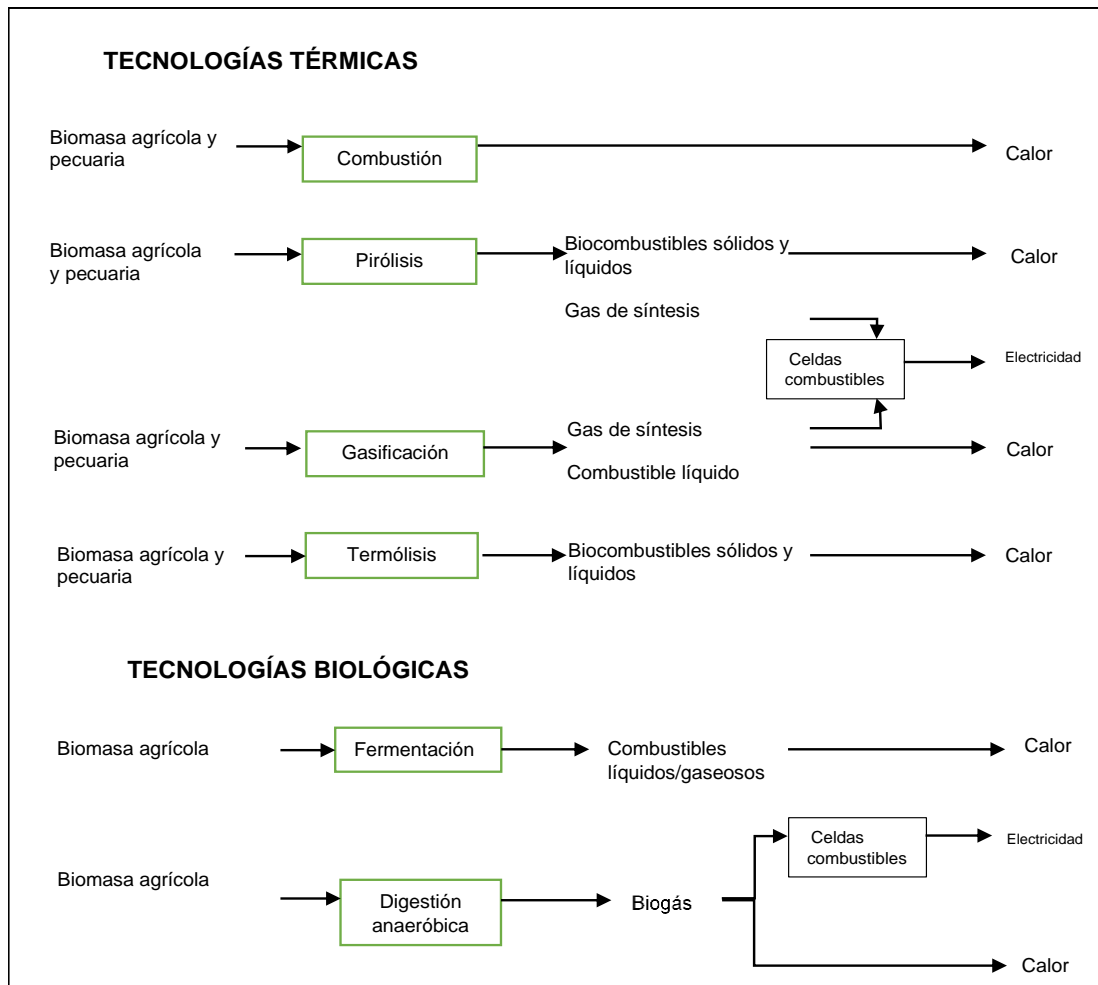


Figura 1. Transformaciones energéticas de la biomasa.

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la digestión anaeróbica pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico u otros; tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los residuos de acuerdo a su origen.

ORIGEN	POSIBLES FUENTES
Animal	Estiércol, orines, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescado.
Vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Humano	Heces, basura, orina.
Agroindustriales	Salvado de arroz, orujos, melazas, residuos de semillas.
Acuáticos	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: universidad distrital Francisco José de Calda.

Existen residuos biodegradables de diferentes orígenes que tienen un potencial de producción de biogás relativamente bajo debido a su bajo contenido de materia orgánica, además de su baja biodegradabilidad. En estos casos, la Co-digestión (CoDA) de residuos se presenta como una metodología exitosa a escala mundial. En este proceso se combinan varias mezclas de sustratos orgánicos biodegradables logrando aumentar el potencial de producción de biogás por kilogramo de mezcla degradado. El proceso mejora el balance de nutrientes del sustrato, disminuye los contenidos de residuos estacionales, genera una mayor producción de biogás y constituye una vía eficaz para conseguir materias primas o ingresos por concepto de gestión de residuos¹⁶.

En la CoDA se debe establecer la sinergia entre los sustratos para aumentar la producción de biogás, en comparación con la mono digestión. Estudios anteriores, afirman que la CoDA puede aumentar la producción de biogás de 25% a 400% sobre la DA de los mismos sustratos. Sin embargo, este es un proceso desafiante debido a los problemas de estabilidad y optimización¹⁷.

2.3 MODELO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO (PE)

El potencial energético (PE) se define como la energía química de la biomasa que puede ser transformada para su aprovechamiento energético. El PE se mide en unidades de energía por unidad de tiempo y se obtiene del producto entre la masa de residuo y su contenido energético. Para determinar PE se utilizó el modelo matemático propuesto por Escalante et al. 2010. Este modelo se fundamenta en que la energía contenida en su materia

¹⁶ GONZÁLEZ, E., CATALINA, J., GÓMEZ E. Sustratos y producción de biogás en biodigestores. Revisión sistemática. Ingeciencia, vol. 2, no. 1, pp. 44–64, 2017.

¹⁷ MOLANO, P., ALEXANDER, Y., RAM, P. HERN R. Anaerobic co digestion from cattle, pig manure and horse manure as an alternative to improve the energetical potential in household digesters. Revistal onvol. 32, no. 2, pp. 29–39, 2019.

es proporcional a su masa seca y, por consiguiente, puede expresarse en forma general como:

$$PE = (M_{rs}) * (E) \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

PE: Potencial energético [TJ/año]

M_{rs} : Masa de residuo seco [t/año]

E: Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t]

La energía del residuo es equivalente al llamado Poder Calorífico Inferior (PCI), cuyas unidades son TJ/t de residuo seco. Teniendo en cuenta la Ecuación 1 y las particularidades de la producción de cada residuo seco del sector agrícola, la Ecuación 2 describe el modelo de potencial energético aplicado en este estudio.

$$M_{rs} = A * R_c * M_{rg} * Y_{rs} \quad \text{Ecuación 2.}$$

A: Área cultivada [ha/año]

R_c : Rendimiento del cultivo [t producto principal / ha sembrada]

M_{rg} : Masa de residuo generada del cultivo [t residuo seco/ t producto principal]

Y_{rs} : Fracción de residuo seco [t residuo seco/ t de residuo húmedo]

Para el caso del sector agrícola se debe tener en cuenta que los residuos de la biomasa contienen una porción del producto principal del cultivo, por lo que, la fracción de residuo seco es normalmente mayor que la unidad.

Por otra parte, la Ecuación 3 se aplicó a un tipo de cultivo si se considera que este puede generar diferentes tipos de residuos.

$$M_{rs} = \alpha * A * R_C * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (M_{rgk_i} * Y_{rsk_i}) \quad \text{Ecuación 3.}$$

El valor de α es igual a $1 * 10^{-6}$, y corresponde a la constante de conversión de unidades. El contador “ k ” hace referencia a la clasificación de la biomasa ya sea RAC y/o RAI mientras que el contador “ i ” hace referencia a los tipos de biomasa residual, en cada una de las clasificaciones.

Una vez obtenida la masa del residuo de biomasa agrícola seca anual (M_{rs}) del cultivo, se reemplaza en la Ecuación 1. El potencial energético global de la biomasa residual agrícola (PE), conformada por los residuos de cosecha y agroindustriales para los cinco cultivos de estudio (banano, aguacate, cítricos, cacao y maracuyá) se evalúa mediante la siguiente expresión descrita por la Ecuación 4.

$$PE = \alpha * A * R_C * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (M_{rgk_i} * Y_{rsk_i} * PCI_{k_i}) \quad \text{Ecuación 4.}$$

PCI: Poder calórico inferior [kJ / kg].

2.4 MODELO DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM)

Para calcular la producción de potencial de biometano se utilizó un modelo de regresión estadística que fue estructurado y validado para predecir la producción de metano por lotes en AD mesofílica de residuos de cultivos¹⁸. Este modelo vincula las características de la materia prima y los parámetros del proceso como su rendimiento de metano. Esto se representa matemáticamente como:

¹⁸ ESCALANTE,H., CASTRO L., MARADEI,P. Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion. Bioresour Technol. vol. 219, pp. 80–90, 2016.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{ij} x_i x_j \quad \text{Ecuación 5.}$$

y : Variable de respuesta (rendimiento de metano $m^3/kg SV$)

x_i, x_j : Denota las variables del descriptor

β_0 : Parámetro opcional de intercepción

β_i : Representa el peso correspondiente a x_i

$\beta_{i,j}$: Mide la interacción entre x_i y x_j

El modelo propuesto tiene un nivel de confianza del 99.8%. Para el modelo de regresión, el error estándar para la predicción fue de 0.03125, el R^2 fue 0.9507 y el R^2 ajustado fue 0.9389. En consecuencia, el modelo obtenido tiene una buena capacidad para interpretar y predecir los datos basados en nueva información [16]. El modelo usado en este trabajo se presenta en la Ecuación 6.

$$y = 0,3445 - 0,0000629x_1x_4 + 0,88 * (-0,003995x_3 + 0,00193x_{3,5}) \\ + x_2(0,00008626x_1 - 0,0001765x_3 \\ - 0,00001934x_6) \quad \text{Ecuación 6.}$$

En donde las variables $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ corresponden a la cantidad de las propiedades fisicoquímicas de cada residuo: x_1 : Celulosa, x_2 : Hemicelulosa, x_3 : Lignina, x_4 : Carbono/Nitrógeno, x_5 : Sólidos Volátiles, x_6 : Sólidos Totales, x_7 : Inóculo/Sustrato.

Este modelo no permite medir el potencial de mezclas de sustratos por lo que se realizaron pruebas experimentales adicionales para obtener el potencial de biometanización por medio de los ensayos de PBM. El objetivo de dichos ensayos es medir la máxima producción de metano de un sustrato

específico. En estas pruebas, el sustrato investigado es mezclado con un cultivo de bacterias anaerobias (inóculo) e incubado por un periodo de 30-60 días. Los sustratos son degradados anaeróbicamente, produciendo principalmente el metano y el dióxido de carbono. Puesto que el metano es el compuesto de interés, el dióxido de carbono usualmente se elimina utilizando un agente depurador (por ejemplo, una solución alcalina). La cantidad de gas producido se determina más comúnmente usando métodos basados ya sea en fenómenos manométricos o volumétricos¹⁹.

¹⁹ GUERRERO,I. Evaluación Del Potencial De Biometanización De La Co- Digestión De Lodos Provenientes Del Tratamiento De Aguas Residuales Municipales Mezclados Con Residuos De Alimentos. Universidad de Antioquia, p. 95, 2016.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo en dos fases: la primera consistió en la estimación de la disponibilidad de biomasa residual en la zona de estudio (corregimiento de San Bernardo-Betulia) y en la segunda fase, se determinó los potenciales energéticos (PE) y de biometanización (PBM).

3.1 FASE I: DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL

3.1.1 Identificación y cuantificación de la biomasa residual en la zona de estudio: En conjunto con la empresa asociada al proyecto, GEMATEC SAS, se estableció la trayectoria de las visitas de campo en el corregimiento de San Bernardo (zona de estudio), en el que se trazó una ruta de 15 posibles fincas a visitar, como se presenta en la Figura 2.

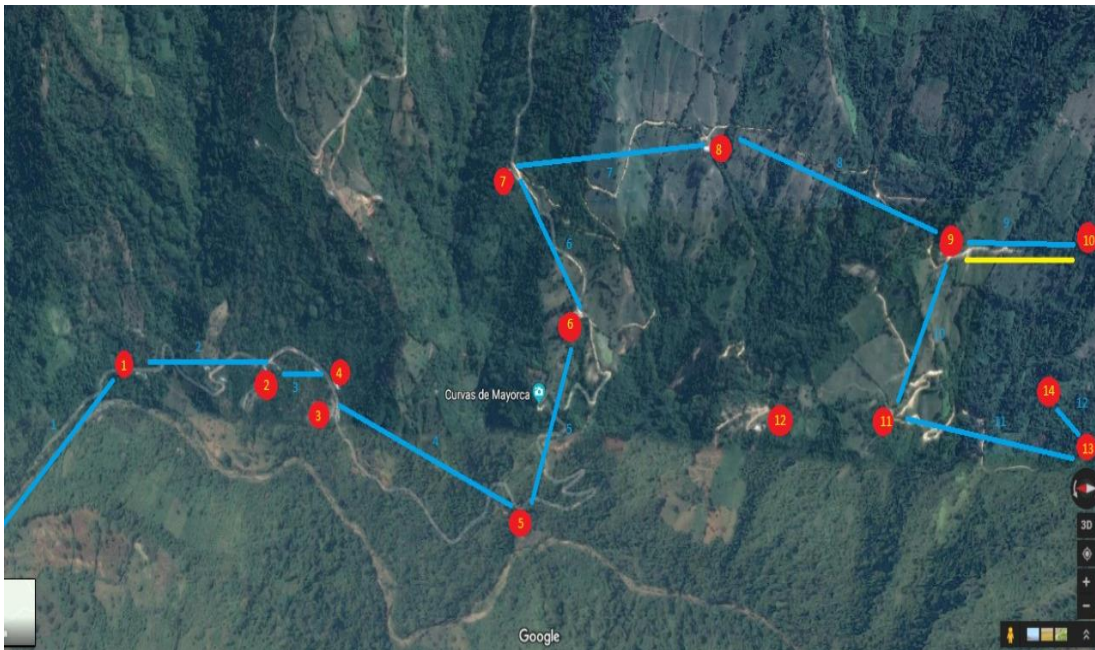


Figura 2. Trayectoria del recorrido realizado en la zona de estudio; Fuente: vista satelital de la herramienta Google Maps.

Se realizaron las visitas de campo a 10 fincas que aceptaron su participación en el proyecto. A éstas, se les aplicó una serie de encuestas con preguntas asociadas a la información requerida del sector pecuario y sector agrícola tales como; tipos de criaderos de animales y número de cabezas de cada uno, tipo de cultivos de la zona, tipos de residuos por cultivo, producción anual, periodos de cosecha y áreas cultivadas. Los formatos de las encuestas se presentan en el ANEXO A.

Igualmente, se consultó el reporte del censo nacional agropecuario más reciente publicado por departamento administrativo nacional (DANE) con lo que se recuperó información adicional que no pudo ser colectada en campo y es requerida para determinar la disponibilidad de biomasa residual de dicha zona²⁰.

3.1.2 Caracterización de la biomasa residual de cultivos de banano, aguacate, cacao y maracuyá: La valorización de biomasa como fuente alterna de energía, involucra el estudio de su composición fisicoquímica y contenido energético. La biomasa es un material formado principalmente por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), su caracterización involucra los análisis elemental, próximo, estructural y energético. Para este estudio, se completó la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de todas las biomásas agrícolas presentes en la zona de estudio ya que una buena parte se encuentra reportada en estudios anteriores realizados por el grupo de investigación INTERFASE²¹²²²³, (ANEXO B). Así, en este trabajo se

²⁰ GUERRERO, J., Evaluación Del Potencial De Biometanización De La Co- Digestión De Lodos Provenientes Del Tratamiento De Aguas Residuales Municipales Mezclados Con Residuos De Alimentos. Universidad de Antioquia, p. 95, 2016.

²¹ GONZÁLEZ, M., ROA, J. Caracterización fisicoquímica de biomasa agrícola representativa en Santander: papa, yuca, mora, papaya, cebolla junca. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2013.

²² GÓMEZ, DAND., PARRA J., Caracterización fisicoquímica de residuos agrícolas en Santander: cacao, cítricos, fique y tomate. Tesis de pregrado. Universidad Industrial Santander. 2013.

caracterizaron los residuos de maracuyá (tallo y hoja) no reportados previamente.

A los residuos del cultivo del maracuyá recolectados en la zona de estudio se les realizó una reducción de tamaño para, posteriormente, ser llevados a un horno y mantenidos a 109°C hasta peso constante. Luego, mediante un mortero se realizó una segunda reducción de tamaño. Finalmente, parte de la muestra fue tamizada hasta obtener una granulometría de 2mm, la cual fue usada para el análisis estructural (celulosa, hemicelulosa y lignina) y de poder calorífico (PCI) en el laboratorio del grupo INTERFASE; siguiendo, respectivamente, los protocolos establecidos en trabajos previos y la norma ASTM D5865 (bomba calorimétrica modelo 6200 Parr Instrument Company). Además, se realizó el análisis próximo (humedad, material volátil, carbono fijo y ceniza) siguiendo la norma ASTM D7582-10 y usando una balanza termogravimétrica (TGA 5500 TA Instruments). Por otro lado, el análisis elemental fue determinado por medio de correlaciones a partir del análisis próximo determinado previamente²⁴.

3.2 FASE II: POTENCIALES ENERGÉTICOS

3.2.1 Determinación del potencial energético (PE): Se determinó el potencial energético global de la zona, así como también para cada una de las fincas mediante el modelo expuesto anteriormente por la Ecuación 4. Este modelo involucra el PCI, el cual se tomó de estudios anteriores de trabajos de ingeniería química y del Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia para la mayoría de las biomásas censadas en

²³ SOLANO, A., MENDOZA, C., Caracterización de los residuos de cultivos agrícolas de aguacate, arracacha, frijol, guayaba y piña producidos en Santander, Colombia. Pregrado presencial. Universidad Industrial Santander.2013.

²⁴ PARIKH,J., CHANNIWALA,S., GHOSAL, G., A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. ScienceDirect, vol. 86, no. 12–13, pp. 1710–1719, 2007.

la zona de estudio²⁵²⁶²⁷. En el caso de los residuos de maracuyá, se realizó la medición del PCI en el laboratorio del grupo INTERFASE.

3.2.2 Determinación del potencial de biometanización (PBM): La estimación del potencial de biometanización generados por las biomásas residuales se realizó en tres fases. Una primera estimación fue realizada usando el modelo teórico de potenciales de biometanización descrito anteriormente por la Ecuación 6, en la que se determinó los rendimientos de metano ($m^3/kgSV$); el cual involucra propiedades fisicoquímicas de las biomásas residuales agrícolas. En la segunda, consistió en la caracterización de los sustratos e inóculo. Finalmente, se realizaron pruebas experimentales de potenciales de biometanización (PBM) en el laboratorio del grupo INTERFASE y sinergia de las mezclas.

3.2.3 Recolección y Caracterización de los sustratos e inóculo: Los sustratos e inóculo se seleccionaron con base a los sistemas de producción (agrícola y pecuaria) más representativos en el área de estudio en cuanto a cantidad y disponibilidad de biomasa; para más detalle ver el ANEXO E. Debido a la disponibilidad local, se utilizó como inóculo digerido de estiércol bovino. En cuanto a los sustratos, se seleccionó una mezcla de estiércol de bovino fresco (EBF), estiércol de equino (EE) y lixiviado de cacao (LC). Este

²⁵ GONZÁLEZ, M., ROA, J. Caracterización fisicoquímica de biomasa agrícola representativa en Santander: papa, yuca, mora, papaya, cebolla junca. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2013.

²⁶ GÓMEZ, DAND., PARRA J., Caracterización fisicoquímica de residuos agrícolas en Santander: cacao, cítricos, fique y tomate. Tesis de pregrado. Universidad Industrial Santander. 2013.

²⁷ SOLANO, A., MENDOZA, C., Caracterización de los residuos de cultivos agrícolas de aguacate, arracacha, frijol, guayaba y piña producidos en Santander, Colombia. Pregrado presencial. Universidad Industrial Santander. 2013.

último fue seleccionado por no ser valorizado en la región y su disposición causa daño al suelo por su alta acidez²⁸.

El sustrato LC se recolectó después de efectuar un proceso de fermentación de cacao realizado en los laboratorios del grupo INTERFASE y siguiendo los protocolos del manual de manejo del cacao²⁹. Para tal fin, los granos de cacao fueron extraídos de frutos frescos. Además, debido a la solidificación que presentan los sustratos EBF y EE se les realizó una disolución en relación 1:3 con agua desionizada según recomienda la literatura^{30,31}.

Los sustratos e inóculo fueron caracterizados mediante análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) por el método gravimétrico. Durante las pruebas de PBM, la medición de PH se realizó en un PH-metro (OHAUS Starter 300) siguiendo el método potenciométrico estándar (ANEXO C), posteriormente, utilizando una centrifuga (universal 320 R), un agitador (Schott SLR) y un PH-metro (OHAUS Starter 300), se llevó acabo la medición de ácidos grasos (AGV) y alcalinidad total (AT) por el método titrimétrico estándar (ANEXO D). Todos los ensayos fueron realizados por triplicado para una mayor precisión en los resultados.

3.2.4 Pruebas experimentales de potencial de biometanización de las mezclas (PBM): La experimentación se desarrolló de la siguiente manera: en primer lugar, se realizó la mono digestión entre el inóculo y cada uno de los sustratos. En segundo lugar, se desarrolló la Co-digestión anaeróbica de los mismos.

²⁸ PARIKH,J., CHANNIWALA,S., Ghosal, G., A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. ScienceDirect, vol. 86, no. 12–13, pp. 1710–1719, 2007.

²⁹FERMENTACIÓN DE CACAO. [en línea]. Disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/FermentaciondeCacao.pdf>.

³⁰ MOJICA , A., VARGAS, B., Potenciales de biometanización y actividades microbiológicas de estiércoles: Bovino, Porcino y Equino a diferentes soluciones. Tesis de pregrado. Universidad Industrial Santander.2018.

³¹ HOLLIGER ET AL,C., Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Sci. Technol., vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, 2016.

Se recomienda que la porción de SV del inóculo sea mayor que la del sustrato para minimizar los problemas de acidificación o inhibición. Por lo tanto, la RIS basados en SV para la mayoría de las aplicaciones deben estar entre dos y cuatro como lo recomienda el protocolo de Holliguer 2016³². Por lo que, para este caso de estudio se estableció una RIS de 2.

El diseño de experimentos de la Co-digestión se realizó como se muestra en la Tabla 2. Las fracciones en masa a evaluar se establecieron inicialmente y el volumen de sustrato se calculó con base en la cantidad de sólidos volátiles tanto del inóculo como de los sustratos.

Tabla 2. *Diseño de experimentos de la Co-digestión.*

ENSAYO	DISEÑO DE EXPERIMENTOS (fracciones másicas)		
Referencia de prueba	EBF	EE	LC
A1	½	½	0
A2	½	0	½
A3	0	½	½
B1	1/3	1/3	1/3
C1	2/3	1/6	1/6
C2	1/6	2/3	1/6
C3	1/6	1/6	2/3

*Sustratos: EBF: estiércol bovino, EE: estiércol equino, LC: lixiviado de cacao. *A1, A2, A3 y B1, C1, C2, C3: Nomenclatura usada en las mezclas binarias y ternarias en las pruebas de PBM, respectivamente.

Los ensayos de PBM se realizaron en botellas de 100 ml con un volumen operacional de 60ml (sustrato e inóculo) y un volumen de 40 ml disponible para la acumulación del gas. Las botellas fueron gasificadas con N₂, selladas con tapón de butilo y agrafe de aluminio, y posteriormente, almacenadas a 37°C. También, se realizó pruebas en blanco (sin sustrato) completando el volumen de operación con agua destilada para determinar la producción endógena de metano del inóculo. Todas las pruebas fueron realizadas por triplicado. La producción de metano fue cuantificada mediante la técnica de

³² HOLLIGER ET AL,C., Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Sci. Technol., vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, 2016.

desplazamiento alcalino con una solución 0,5 N de NaOH, la cual absorbe el CO₂. Siendo así, el volumen de metano equivalente al volumen desplazado por la solución alcalina. Estas pruebas fueron monitoreadas por 30 días, tal como se sintetiza en el ANEXO G. Para llevar a condiciones normales el volumen de metano producido se utilizó la Ecuación 7. Finalmente, el PBM se obtuvo con la ecuación 8.

$$V_0 = V \frac{(P - P_V)T_0}{P_0 T} \quad \text{Ecuación 7.}$$

V_0 : Volumen de gas seco en condiciones normales.

V : Volumen registrado de biogás en la medición.

P : Presión de la fase de biogás en el momento de la lectura.

P_V : Presión de vapor en función de la temperatura ambiente.

T_0 : Temperatura normal (273,15K).

P_0 : Presión normal (101325Pa)

T : Temperatura ambiente.

$$PBM = \frac{V_0}{SV} \quad \text{Ecuación 8.}$$

PBM : Potencial de biometanización (m³ CH₄/kg SV adicionados).

SV : Sólidos volátiles (kg sv).

3.2.5 Determinación de la sinergia de la Co-digestión: La sinergia (Φ) se refiere a la descripción del trabajo colectivo de varios actores, creando así un efecto más grande que el esperado por la suma de los efectos de cada uno al operar independientemente. Para calcular los efectos sinérgicos de la Co-digestión anaeróbica se realizó una comparación de la producción específica de metano de cada Co-digestión ($PBM_{\text{Co-digestión}}$) con el PBM ponderado ($PBM_{\text{ponderado}}$) de acuerdo con la ecuación 9 propuesta por Labatut RA, Angenent LT, Scott NR [15].

$$\phi = \frac{PBM_{co-digestión}}{PBM_{ponderado}} \quad \text{Ecuación 9.}$$

$$PBM_{ponderado} = PBM_1 * f_1 + PBM_2 * f_2 + \dots + PBM_n * f_n \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde PBM_n representa la producción de metano de las mono digestiones del componente n. Los valores de f_1 , f_2 , f_n son las fracciones de SV adicionados del componente n.

4. RESULTADOS

4.1 Disponibilidad de biomasa residual en la zona.

En la Figura 3 se presenta las biomásas identificadas en la zona de estudio con base a las encuestas realizadas (corregimiento de San Bernardo, Betulia), los cuales corresponden a residuos de cosecha y postcosecha de cultivos característicos de la región tales como banano, aguacate, cítricos, cacao y maracuyá. Para cada uno de los residuos se estimó la masa residual a partir del área, del factor residuo y del rendimiento agrícola de la cosecha, los cuales son mostrados en el ANEXO E, F.

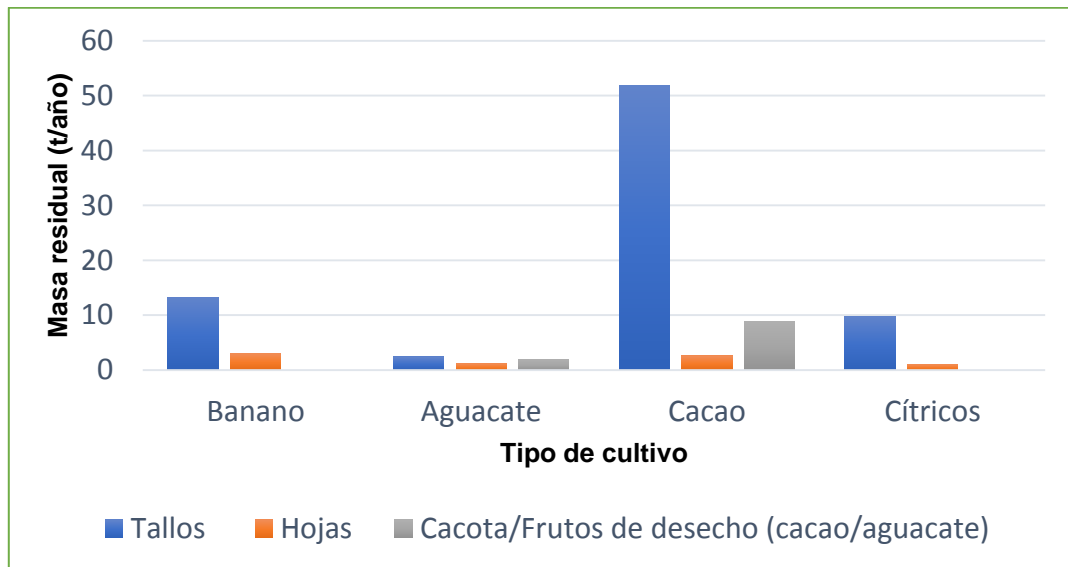


Figura 3. Biomasa residual en la zona de estudio.

Los resultados muestran que, en su mayoría, la biomasa residual corresponde a los residuos de tallo y hoja con unas 77,14 y 7,83 toneladas/año del total, respectivamente, presentando una disponibilidad de biomasa total de 95,72 ton/año. Cabe resaltar que el cacao es el cultivo más abundante de la zona y, por ende, es el que presenta mayor generación de

residuos favoreciendo considerablemente la oferta total de biomasa residual en el área de estudio (en un 66,06%).

Por otra parte, se observó que la zona también genera residuos (mayoritariamente estiércol) de sistemas de producción pecuaria como lo son bovina, porcina, equina y avícola. Sin embargo, de la información recolectada, se evidencia que los sistemas de producción pecuaria aún son muy tradicionales en la zona, puesto que, en su mayoría tienen los animales a la intemperie, con alimentación por pastoreo y un 50% de las fincas no le dan uso al estiércol generado. Se observó que el estiércol bovino es uno de los residuos más abundante en la zona con un 96,7% del total generado; para más detalles ver el ANEXO E.

4.1.1 Caracterización de la biomasa residual generada por el cultivo de maracuyá: Teniendo en cuenta los estudios previos realizados por el grupo INTERFASE, así como la información contenida en el atlas del potencial energético³³, se concluyó que solo era necesario realizar la caracterización del cultivo de maracuyá.

En la Tabla 3, se presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica de las biomásas residuales del cultivo de maracuyá en la zona de estudio (el balance se presenta en el ANEXO H). Los detalles de la caracterización de las otras biomásas se presentan en el ANEXO B.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual del cultivo de maracuyá.

ANÁLISIS	PROPIEDAD	TALLO	HOJAS
Próximo (%Peso)	Material Volátil	92,70	95,12
	Carbono Fijo	3,21	0,03
	Cenizas	4,09	4,85
Último (%Peso)	Carbono	44,22	43,30
	Hidrógeno	5,91	5,90
	Oxígeno	45,10	45,29
Contenido energético	PCI	18971,50	19060,50

³³ ESCALANTE, H., JANNETH, O., JOSUÉ, H. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. p. 5, 2010.

(kJ/kg)			
Estructural (%Peso)	Celulosa	8,535	3,294
	Hemicelulosa	23,956	0,353
	Lignina	45,22	35,39
Otro parámetro (%Peso)	Humedad	80,58	81,08

4.2 Determinación del Potencial energético (PE)

La Figura 4 presenta el potencial energético por finca censada en el corregimiento de San Bernardo, el cual fue calculado a partir de las cantidades de biomasa residual disponible.

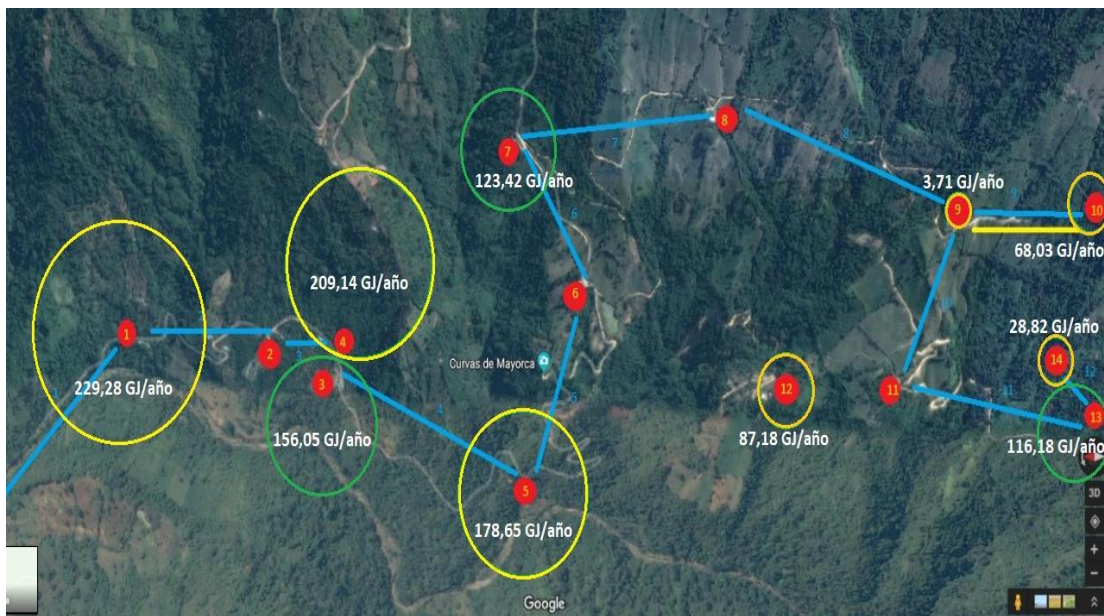


Figura 4. Potencial energético de la biomasa residual agrícola; Fuente: vista satelital de la herramienta Google Maps.

Según los resultados, se destacan las fincas 1, 4, y 5 por presentar los mayores potenciales energéticos debido a su gran área cultivada, gran variedad de cultivos y constantes podas al año; según datos recolectados (ANEXO F). Obteniendo finalmente un potencial energético total de la zona de aproximadamente 1270 GJ/año, demostrando que esta zona cuenta con un gran potencial energético para ser aprovechado energéticamente.

La potencia eléctrica habitualmente instalada en una vivienda media (familia de 4 miembros) es de 5 kWh, y la energía consumida anualmente es de unos 7000 kWh/año según reporta la literatura³⁴; es decir, el potencial energético producido en la zona teóricamente podría abastecer aproximadamente 50 viviendas al año.

4.3 Potencial de biometanización (PBM)

Completada la caracterización de todas las biomásas residuales de los cultivos agrícolas de la zona (ANEXO B), se determinó el PBM teórico para cada una de las fincas por medio de la Ecuación 6, y se presentan en la Figura 5.

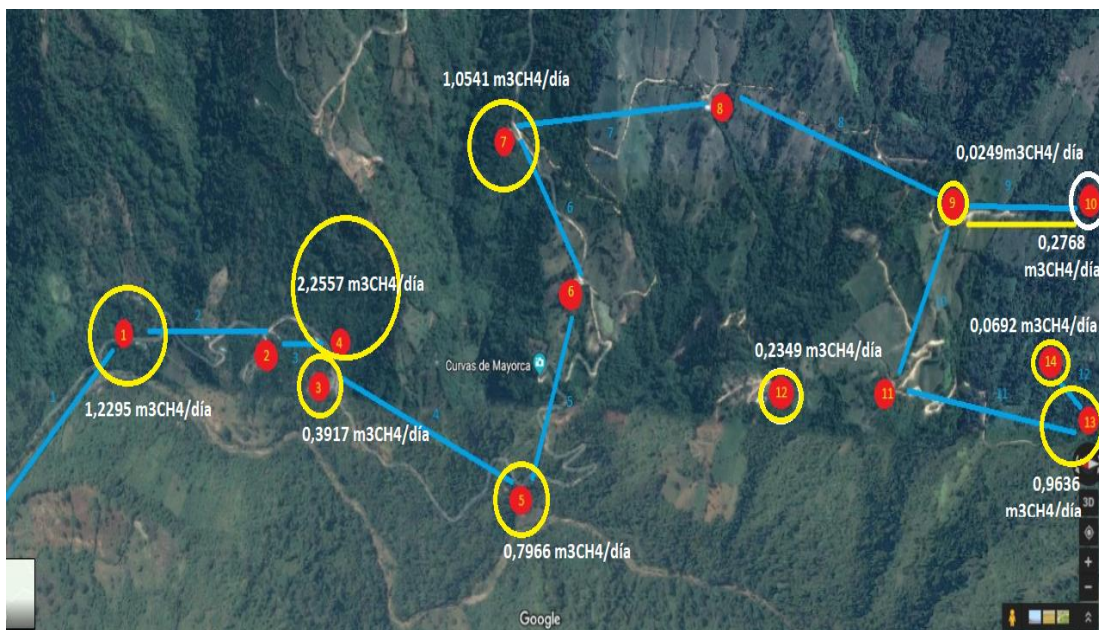


Figura 5. Potencial teórico de biometanización de la biomasa residual agrícola; Fuente: vista satelital de la herramienta Google Maps.

³⁴ SCHALLENBERG , J. et al., Energías renovables y eficiencia energética, Primera ed. 2018.

De acuerdo con la bibliografía^{35,36}, la DA de los residuos de cultivos agrícolas se ve afectada por la hidrólisis, lo que limita el proceso de degradación, por ello, aquellos residuos que tienen un alto contenido de lignina reflejan una baja producción de metano³⁷. En contraste, Los mayores rendimientos de biometanización teórico se obtuvieron para los residuos cítricos, generados en mayor proporción en las fincas 1 y 4. Obteniéndose finalmente un potencial biometanización teórico total de la zona de aproximadamente 7,3 m³/SV día.

4.3.1 Caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo: En la Tabla 4, se presenta la caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo seleccionados para esta parte del estudio.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo.

Parámetro	Unidades	INÓCULO	SUSTRATOS		
			EBF	EE	LC
pH	-	6,89	7,44	7,74	3,06
ST	[g/kg]	35,56	165,78	20,41	119,37
SV	[g/kg]	27,93	140,17	15,60	82,96
SF	[g/kg]	7,63	25,61	4,81	36,41
AT	[mgCaCO ₃ /L]	2666,67	900	300	-
AGV	[mgCaCO ₃ /L]	720	960	560	40240

³⁵ ESCALANTE,H., CASTRO L., MARADEI,P. Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion. Bioresour Technol. vol. 219, pp. 80–90, 2016.

³⁶ CASTRO L., ESCALANTE, H., JAIMES, E., Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. Bioresour Technol., vol. 239, pp. 311–317, 2017.

³⁷ ESCALANTE,H., CASTRO L., MARADEI,P. Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion. Bioresour Technol. vol. 219, pp. 80–90, 2016.

Se observa que el pH del inóculo y de los sustratos EBF, EE se encuentran en el rango óptimo de operación (6,5 - 7,5). En el sustrato LC se evidencia un alto contenido de SV, lo que puede ocasionar una disminución en la movilidad de las bacterias y afectar de ese modo, la producción de biogás. Además, este sustrato (LC) presenta un pH bajo y una cantidad alta de AGV, estando estos fuera de los rangos óptimos de operación, lo que puede provocar inhibición durante el proceso de la DA.

4.3.2 PBM de la mono digestión del inóculo (digerido de EB) con los sustratos (EBF, EE, LC): El pH es un parámetro operacional importante en la DA debido a que las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las variaciones de acidez (pH > 8 la carga corre riesgo de putrefacción y pH < 6 indica descompensación entre fase ácida y metanogénica) afectando directamente la producción de metano³⁸. Por ende, en la Tabla 5 se presentan los valores de pH medidos al inicio y final del proceso del PBM.

Tabla 5. Valores de pH al inicio y final del PBM de la mono digestión.

Parámetro	SUSTRATO		
	EBF	EE	LC
pH inicial	7,22	7,43	6,02
pH final	6,55	6,47	3,68

En el final del proceso, se observa que el pH final varía considerablemente con respecto al pH inicial; sin embargo, los sustratos EBF y EE se mantienen dentro del rango de operación (6,5-7,5). Caso contrario, para el sustrato LC quien presentó un pH de 3,68 al final del proceso. Este comportamiento de caída de pH se justifica con la velocidad en que se producen los AGV (Tabla 4) tal como reporta estudios anteriores³⁹.

³⁸ MORENO, M., Manual de biogás de Chile Remoción Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renov., vol. 64, no. 6, p. 145, 2011.

³⁹ PINZÓN, G. Co-digestión anaeróbica de estiércol bovino y sobrantes alimenticios de restaurante en un reactor de tanque agitado. Universidad Industrial de Santander. 2017.

En la Figura 6 se presenta la producción de metano a partir de la mona digestión obtenida durante las pruebas de PMB.

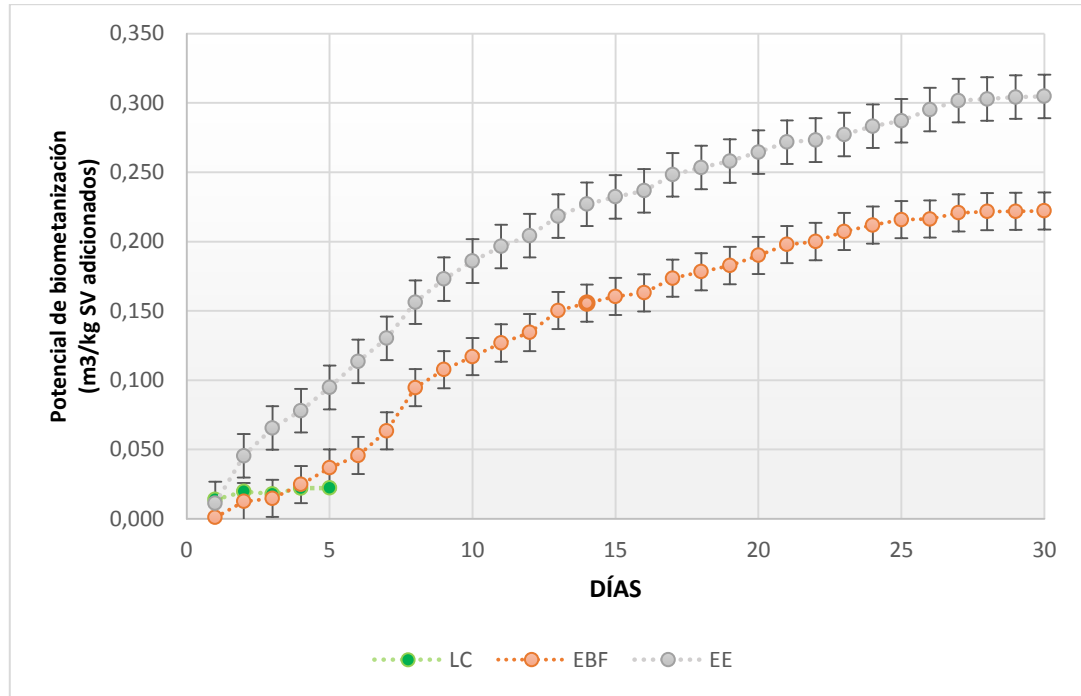


Figura 6. Potencial de biometanización para la mono digestión del inóculo con los sustratos EBF, EE, LC.

Al inicio de las pruebas de PBM, los sustratos EE y EBF se presentan atractivos para la producción de metano, observándose un crecimiento exponencial en la producción de metano desde el día 1; como se observa en la Figura 6. Por el contrario, el sustrato LC se estabilizó durante los primeros cinco días, de manera que se inhibió y cesó la producción de metano. El valor de pH final es de 3,68; lo que confirma este fenómeno.

Por otro lado, se observa una diferencia considerable en la producción de metano entre los sustratos EBF y EE, que, aunque los dos presentan una tendencia exponencial similar, la mayor producción de metano es obtenida con el sustrato EE, cuya producción acumulada de metano fue de 0,305

m³/kg SV adicionados mientras que la producción de metano del sustrato EBF fue tan sólo de 0,222 m³/kg SV adicionados.

En la Tabla 6 se resumen valores obtenidos al final de las pruebas de PMB de la mono digestión para todos los sustratos estudiados, cabe resaltar que estos valores corresponden al PBM neto de las pruebas experimentales.

Tabla 6. Resultados finales de PMB de la Mono digestión de los sustratos EBF, EE, LC.

Referencia de prueba	EBF	EE	LC	Potencial de biometanización (m ³ CH ₄ /kg SV adicionados)
EBF	1	0	0	0,222
EE	0	1	0	0,305
LC	0	0	1	0,022

*EBF, EE, LC: Sustratos evaluados.

Tal como se esperaba, los sustratos EBF y EE reportan considerables producciones de metano debido a sus características estables; logrando una producción de metano con tendencia creciente favorable en el proceso de DA (Tabla 6). Por el contrario, se observa que al emplear LC como sustrato tiene sus limitaciones debido a su acidez, afectando directamente la producción de metano.

4.3.3 PBM de la Co-digestión del inóculo (digerido EBF) con los sustratos (EBF, EE, LC): En la Tabla 7 se muestran los valores de pH medidos al inicio y final del PBM llevado a cabo por 30 días. Para cada prueba, la relación de mezcla se encuentra indicada en la Tabla 3.

Tabla 7. Valores de pH al inicio y final del PMB de la Co-digestión.

Parámetro	BINARIAS			TERNARIAS			
	A1	A2	A3	B1	C1	C2	C3
pH inicio	7,24	6,42	6,66	6,93	6,03	7,04	6,54
pH final	6,84	4,45	4,44	6,71	6,83	6,52	3,69

Se observa que, para la gran mayoría de las mezclas binarias y ternarias, los valores de pH inicial se encuentran entre los rangos óptimos de operación (6,5-7,5), a excepción de A2 y C1. Las mezclas binarias (A2, A3) y ternaria (C3) presentaron acidificación lo que generó inhibiciones en el proceso, esto se debe a que contienen una mayor cantidad del sustrato LC, el cual por si solo tiene una alta acidez (Tabla 4). En el día 30, los valores de pH de la mezcla binaria A1 y las mezclas ternarias (B1, C1, C2) se mantuvieron dentro de los rangos óptimos de operación según reporta la literatura⁴⁰.

En la Figura 7,8 se presenta el potencial de biometanización para la digestión binaria y ternaria, respectivamente.

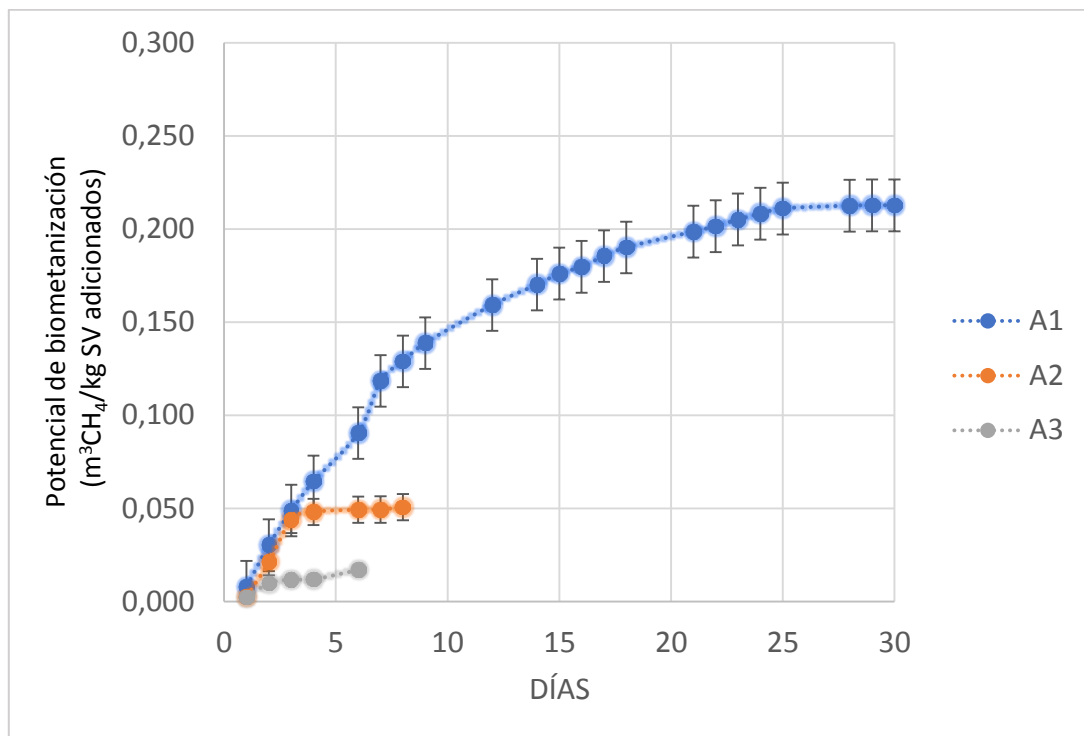


Figura 7.8. Potencial de biometanización: digestión binaria.

⁴⁰ ACOSTA, Y., ABREU, M., Aspectos teóricos de La digestión anaerobia parte institución DE . Cuba. Investigación de los derivados la caña Azúcar. vol. 1, 2005.

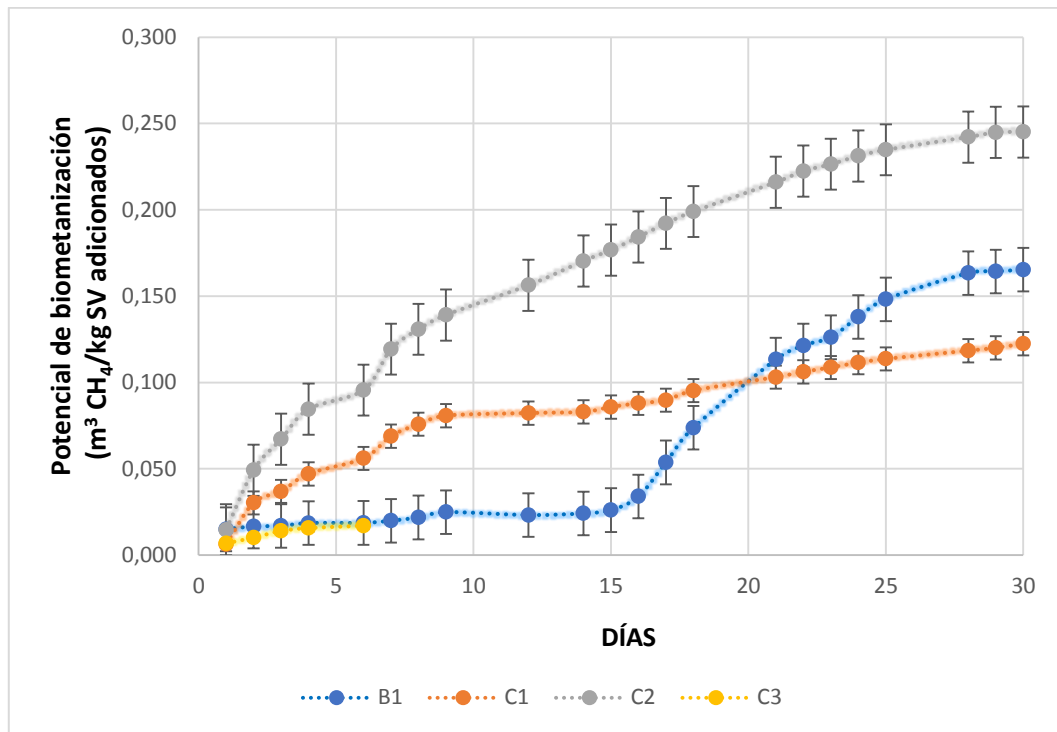


Figura 8. *Potencial de biometanización: digestión ternaria.*

En la digestión de las mezclas binarias, el ensayo A1 (EB:1/2, EE:1/2) presenta un comportamiento exponencial en la producción de metano alcanzando el estado estacionario en el día 25; Los resultados indican que la mezcla estiércol equino y estiércol bovino presenta las mejores propiedades bioquímicas para alcanzar altos rendimientos de metano 0,222 m³/kg SV adicionados. En los ensayos A2, A3 la producción de metano se estabilizó entre el sexto y el octavo día debido a una inhibición del proceso como se confirma por los valores de pH al final alcanzados (Tabla 7); produciendo los valores de producción de metano más bajos 0,049, 0,017 m³/kg SV adicionados, respectivamente.

En la digestión de las mezclas ternarias, se evidencio la influencia del sustrato EE en los ensayos C1 y C2. El ensayo (C2) con mayor cantidad del sustrato EE alcanzó la mayor producción de metano 0,245 m³/kg SV

adicionados, en comparación con C1; como se observa en la Figura 8. Los resultados indican que utilizar estiércol equino presenta las mejores propiedades bioquímicas para alcanzar altos rendimientos de metano⁴¹. En el caso del ensayo B1, se observan dos tendencias: hasta el día 15 se presenta hidrólisis lenta y presencia de la fase de adaptación (Lag). Posteriormente, en el día 16 empezó a incrementar la producción de metano de manera exponencial logrando el estado estacionario en el día 27; alcanzando una producción de metano de 0,165 m³/kg SV adicionados. En el ensayo C3 se obtuvo la producción de metano más baja (0,017 m³/kg SV adicionados), el cual se debe a cantidad de LC agregada.

4.3.4 Análisis de sinergia para los sustratos en la Co-digestión: La sinergia en la Co-digestión anaeróbica se describe como interacciones positivas entre los sustratos. En la Tabla 8 se presenta la sinergia de la Co-digestión.

Tabla 8. *Potencial de biometanización y Sinergia de la Co-digestión.*

Nombre de ensayo	EB	EE	LC	SINERGIA	Potencial de biometanización (m ³ /kg SV adicionados)
A1	½	½	0	0,808	0,213
A2	½	0	½	0,401	0,049
A3	0	½	½	0,103	0,017
B1	1/3	1/3	1/3	0,901	0,165
C1	2/3	1/6	1/6	0,604	0,122
C2	1/6	2/3	1/6	1,040	0,245
C3	1/6	1/6	2/3	0,165	0,017

Se evidenció que tanto en las mezclas binarias y terciarias con menor sinergia fueron aquellas que contenían mayor o igual cantidad de lixiviado de

⁴¹ MOLANO,L., ALEXANDER,Y., RAM,P., HERN,E., Anaerobic co digestion from cattle, pig manure and horse manure as an alternative to improve the energetical potential in household digesters. *Ion*, vol. 32, no. 2, pp. 29–39, 2019.

cacao. La gran mayoría de las Co-digestiones presentaron efecto antagónico ($\Phi < 1$), lo que permite afirmar, que la relación de mezcla y el tipo de sustrato influyen significativamente en el rendimiento del proceso lo que concuerda con el observado en la mezcla ternaria C2 ($\Phi > 1$).

La sinergia se utiliza como indicador para seleccionar las relaciones de mezcla adecuadas para digestión anaeróbica. De esta manera, se concluye que utilizar el lixiviado del cacao (LC) como sustrato en mayores proporciones con respecto a los demás sustratos, no resulta ser conveniente para el proceso de DA.

4.4 Aplicación sobre un caso de estudio

Como caso de estudio se seleccionó la finca 12. La cual presenta características propias de la zona en sus sistemas de producción agrícola y pecuaria. Esta cuenta con cultivos agrícolas tales como maracuyá, cítricos, aguacate y cacao. Genera una biomasa residual de 6,46 t/año y tiene un PE de 87,18 GJ/año. Su producción de cacao seco es de 1000 kg/día, lo que significa una producción de 590 kg/día de lixiviado de cacao; según rendimiento reportados por la Universidad de las Palmas de Gran Canaria⁴². Tiene una producción pecuaria de bovino y equino a la intemperie con alimentación por pastoreo, los cuales generan 125 y 12 kg de estiércol/día (datos calculados de acuerdo a los rendimientos reportados por el manual de biogás), respectivamente.

Con base en los resultados obtenidos en la Co-digestión anaeróbica de los sustratos evaluados, se realizó un escalado de acuerdo al diseño de mezcla C2 que resultó ser la mejor mezcla (Tabla 8), y se estimó teóricamente la producción diaria de biometano que corresponde a 4,6552 m³/día; como se presenta en la Tabla 9.

⁴² BALLADANES, C., Caracterización físico-química de los desechos agrícolas del cacao y café del litoral ecuatoriano y su potencial empleo como biocombustible. España, p. 198, 2016.

Tabla 9. Producción de biogás teórica en la finca 12 con base en el diseño de mezcla C2.

DISEÑO DE MEZCLA C2					
TIPO	NOMENCLATURA	SV (g) Adicionados	TOTAL SV (g)	Fracciones	V° CH ₄ diario (m ³)
INÓCULO SUSTRATOS	Digerido de EB	1,65	2,48	-	0,0068
	EBF	0,13		1/6	
	EE	0,55		2/3	
	LC	0,13		1/6	
ESCALADO DE ACUERDO A LA BIOMASA GENERADA EN LA FINCA					
TIPO	NOMENCLATURA	RESIDUO (kg/día)	TOTAL SV (g)	SV (g) para adicionar	V° CH ₄ diario (m ³)
INÓCULO SUSTRATOS	Digerido de EB	-	1709,36	1139,60	4,6552
	EBF	125		94,93	
	EE	12		379,88	
	LC	1,61		94,93	

La cocción de alimentos es una de las aplicaciones del biogás más implementadas en zonas rurales no interconectadas. Según la literatura con 1m³ de biogás se puede cocinar 3 comidas para una familia de 4 personas, es decir, de los 4,6552 m³ de biogás que pueden ser producidos en la finca de estudio, se estarían desaprovechando 3,6552 m³ de biogás.

En este orden de ideas, próximos estudios buscarán aprovechar el biogás en exceso usándolo para producción de energía en sistemas ORC (Organic Rankine Cycle). Este sistema trabaja igual que un ciclo Rankine, excepto porque maneja un fluido orgánico de menor punto de ebullición que el agua con el fin de conseguir temperaturas más bajas de operación y reducir los costos de inversión del sistema a pequeña escala (debajo de los kW). La configuración más clásica de este tipo de sistemas permite que el fluido orgánico sea inicialmente calentado por una fuente externa, como la energía solar, para luego alimentar una turbina y generar energía eléctrica. Sin embargo, la energía solar es limitada a ciertas horas del día, es aquí donde

el biogás puede sustituir la energía solar en horas nocturnas, como fuente externa de energía en un sistema ORC.

5. CONCLUSIONES

La disponibilidad de biomasa residual en el corregimiento de San Bernardo (zona de estudio) es de 95,72 t/año, los cuales corresponden a residuos (tallos, hojas, frutos de desechos) de cultivos agrícolas como banano, aguacate, cítricos, y cacao. Esta biomasa posee un PE de 1270,46 GJ/año, lo cual indica que estos residuos pueden ser aprovechados energéticamente.

Se determinó el potencial de biometanización de las mezclas de sustratos (EBF, EE, LC) e inóculo seleccionados de acuerdo a los sistemas de producción presentes en dicha zona. Obteniéndose la mayor producción acumulada de metano para la mezcla C2 (EBF:1/3, EE:2/3, LC:1/3) con una producción de 0,243 m³CH₄/kg SV adicionados; demostrándose con base a la sinergia la efectividad del proceso de Co-digestión en bajas cantidades del sustrato LC para los procesos de DA.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA,Y., ABREU,M., Aspectos teóricos de La digestión anaerobia parte institución DE . Cuba. Investigacion de los derivados la caña Azúcar.vol. 1, 2005.

ARIZA,C., TONCEL, L. BLANCHAR,J., Biodigestión anaerobia como alternativa energética para reducir el consumo de leña en las zonas rurales consumption of firewood in rural areas. Rev. Espac., vol. 39, p. 23, 2018.

BALLADANES,C.,Caracterización fisico-quimica de los desechos agrícolas del cacao y cafe del litoral ecuatoriano y su potencial empleo como biocombustible. España, p. 198, 2016.

CASTRO L., ESCALANTE, H., JAIMES, E., Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. Bioresour Technol., vol. 239, pp. 311–317, 2017.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL. Censo Agropecuario. Esquema de ordenamiento territorial del municipio de Betulia.2002. p.79.

DEPARTAMENTO NACIONAL AGROPECUARIO. Boletín Técnico. Primer semestre 2019.p.4.[en línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2019/boletin_ena_209-I.pdf_

ESCALANTE, H., JANNETH,O., JOSUÉ, H. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia.p. 5, 2010.

ESCALANTE,H., CASTRO L., MARADEI,P. Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion. Bioresour Technol. vol. 219, pp. 80–90, 2016.

FERMENTACIÓN DEL CACAO. [en línea]. Disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/FermentaciondeCacao.pdf>.

GARCIA-AMADO, K., Codigestión Anaeróbica De Estiércol Y Lodos De Depuradora Para Produccion De Biogás. Tesis de pregrado.Universidad. Cádiz, p. 76, 2009.

GARRIDO, S., Centrales termoeléctricas de biomasa. Renovetec, vol. 1, 2012. [en línea]. Disponible en: <http://www.renovetec.com/165-centrales-termoelectricas-de-biomasa>.

GÓMEZ, DAND., PARRA J., Caracterización fisicoquímica de residuos agrícolas en Santander: cacao, cítricos, fique y tomate. Tesis de pregrado.Universidad Industrial Santander.2013.

GONZÁLEZ, E., CATALINA, J., GÓMEZ E. Sustratos y producción de biogás en biodigestores. Revisión sistemática.Ingeciencia, vol. 2, no. 1, pp. 44–64, 2017.

GUERRERO,I. Evaluación Del Potencial De Biometanización De La Co-Digestión De Lodos Provenientes Del Tratamiento De Aguas Residuales Municipales Mezclados Con Residuos De Alimentos. Universidad de Antioquia, p. 95, 2016.

HOLLIGER ET AL,C., Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Sci. Technol., vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, 2016.

MARÍN,J. BOTERO,C., MORENO,W.,HERNÁNDEZ,R. Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia revisión junio de 2016. UPME, p. 55.

MOJICA , A., VARGAS, B., Potenciales de biometanización y actividades microbiológicas de estiércoles: Bovino, Porcino y Equino a diferentes soluciones. Tesis de pregrado. Universidad Industrial Santander. 2018.

MOLANO,L., ALEXANDER,Y., RAM,P., HERN,E., Anaerobic co digestion from cattle, pig manure and horse manure as an alternative to improve the energetical potential in household digesters. *Ion*, vol. 32, no. 2, pp. 29–39, 2019.

MORENO, M., Manual de biogás de Chile Remoción Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables, vol. 64, no. 6, p. 145, 2011.

PARIKH,J., CHANNIWALA,S., GHOSAL, G., A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *ScienceDirect*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1710–1719, 2007.

PINZÓN, G. Co-digestión anaeróbica de estiércol bovino y sobrantes alimenticios de restaurante en un reactor de tanque agitado. Universidad Industrial de Santander. 2017.

SCHALLENBERG , J. et al., Energías renovables y eficiencia energética, Primera ed. 2018.

SOLANO, A., MENDOZA, C., Caracterización de los residuos de cultivos agrícolas de aguacate, arracacha, frijol, guayaba y piña producidos en Santander, Colombia. Pregrado presencial. Universidad Industrial Santander. 2013.

ANEXOS

ANEXO A. Formatos de las plantillas aplicadas en la zona de estudio.

A. PLANTILLA INFORMATIVA DEL SITIO DE MUESTREO (AGRÍCOLA)

Fecha: _____ N° Muestra: _____
Dirección: _____ Municipio: _____
Evaluador responsable: _____
Personal que atendió al evaluador: _____

Preguntas al Cultivador

1. CLASIFICACIÓN CULTIVO:

Escriba en el recuadro T para cultivo transitorio y P para cultivo permanente

Arroz	<input type="checkbox"/>	Maíz	<input type="checkbox"/>	Maracuyá	<input type="checkbox"/>
Banano	<input type="checkbox"/>	Café	<input type="checkbox"/>	Plátano	<input type="checkbox"/>
Caña de Azúcar	<input type="checkbox"/>	Caña de Panela	<input type="checkbox"/>	Palma de Aceite	<input type="checkbox"/>
Cítricos	<input type="checkbox"/>	Cacao	<input type="checkbox"/>	Aguate	<input type="checkbox"/>

OTROS: _____

2. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO:

Páramo (0-12°)	<input type="checkbox"/>	Frio (12-18°)	<input type="checkbox"/>
Templado (18-24°)	<input type="checkbox"/>	Cálido (Mayor a 24°)	<input type="checkbox"/>

Observaciones: _____

3. USO ACTUAL DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS

Alimentación de animales Compostaje Otros

Para otros, especifique: _____

Especifique el porcentaje aproximado de uso del residuo:

0% 25% 50% 75% 100%

B. FORMATO DE ENTREVISTA A LOS CULTIVADORES

Fecha: _____ N° Muestra: _____
 Dirección: _____ Municipio: _____
 Evaluador responsable: _____
 Personal que atendió al evaluador: _____

TIPO DE CULTIVO: _____

PREGUNTAS A LOS CULTIVADORES

1. Área sembrada del cultivo [Ha]: _____
2. Plantas: _____
3. Tiempo de cosecha: _____
4. Cosechas anuales: _____
5. Periodo y/o frecuencia de poda o retiro de desechos: _____
6. Origen de los desechos de la planta (Especifique si otros):

Tallo Hojas Fruto

Otros desechos: _____

C. MEDICIONES DEL EJECUTADOR DE LA MUESTRA

- Distancia entre plantas (largo):
- Distancia entre plantas (ancho):
- Plantas/m²:
- Plantas por Hectárea:

	TIPO DE DESECHO	CANTIDAD POR PLANTA [Kg]	CANTIDAD POR m ² [Kg]	CANTIDAD POR Ha [Kg]
RAC				
RAI				

Observaciones: _____

D. PLANTILLA INFORMATIVA DEL SITIO DE MUESTREO (PECUARIA)

Fecha: _____

N° Muestra: _____

Dirección: _____

Municipio: _____

Evaluador responsable: _____

Personal que atendió al evaluador: _____

1. CLASIFICACIÓN GANADO:

BOVINO Leche: Doble Propósito Ceba de ganado

AVÍCOLA Ponedoras Engorde

PORCINO Cerdas Gestantes Cerdas Reemplazo Cerdos En Ceba

Cerdos en Levante Lechones Lactantes Reproductores

Todos

2. CARACTERÍSTICAS DEL SITIO:

Cubierto Descubierta Tecnificado No Tecnificado

3. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO:

Húmedo Seco

Observaciones: _____

4. TIPO DE ALIMENTACIÓN:

Pastoreo Pasto de Corte Concentrado Suplemento Otros

Observaciones: _____

5. USO ACTUAL DEL ESTIÉRCOL:

Abono Biodigestión Compostaje

Alimentación Ninguna

Conoce proyectos donde utilicen este tipo de biomasa:

6. EN AVES TIPO CAMA:

Cama cascarilla Cama viruta Paja

ANEXO B. Recopilación de las Caracterizaciones de las propiedades fisicoquímicas de las biomásas presentes en la zona de estudio

[6][5][4][20]

Residuo	TIPO	Análisis básico(% peso)		Análisis Próximo (%peso)			Análisis Ultimo (% peso)					PCI (KJ/Kg)	Factor de residuo	Análisis Estructural					Otros Parámetros		
		Húmedad	Sólidos Totales	Material Volatil	Carbono Fijo	Cenizas	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre			Grasas	Proteína	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Sol. Volátiles Totales	Materia Orgánica	Relación C/N
café																					
Pulpa	RAI	80,62	19,38	85,72	7,07	7,21	51,80	5,95	37,21	1,06	0,09	16517,50	2,13	2,81	2,57	26,06	21,60	23,34	17,98	89,31	48,75
Cisco	RAI	10,42	89,58	98,82	0,51	0,67	57,69	6,63	33,10	0,53	0,03	19264,57	0,21	0,96	1,24	35,55	21,89	32,33	88,98	99,46	108,90
Tallos	RAC	29,01	70,99	89,35	4,60	2,60	52,50	6,03	35,01	0,69	0,10	19062,23	3,02	0,97	1,97	34,84	20,84	30,39	93,96	90,51	169,34
Banano																					
Raquis	RAC	94,54	5,46	58,96	17,23	23,80	33,38	4,71	37,70	1,13	0,38	7862,64	1,00	0,36	6,69	VNR	VNR	VNR	4,16	46,11	27,50
Vastago	RAC	93,62	6,38	66,09	20,93	12,99	36,46	5,55	44,33	0,59	0,07	8836,40	5,00	0,56	3,18	VNR	VNR	VNR	5,55	51,81	61,02
Banano de rechazo	RAI	83,75	16,25	73,61	21,00	5,38	38,55	6,14	49,13	0,78	0,02	10819,83	0,15	0,75	4,75	36,79	10,36	49,42	15,37	62,54	49,95
Aguacate																					
Cascara	RAI	82,42	17,58	16,90	4,86	0,62	50,70	5,83	37,45	0,90	0,06	14647,17	0,02	4,08	5,63	21,26	18,71	28,63	87,42	87,42	56,33
Descarte	RAI	74,17	25,83	25,24	3,06	0,58	55,17	6,34	31,93	1,18	0,06	14686,40	0,04	12,27	7,38	26,07	5,40	36,60	95,11	95,11	46,75
Poda	RAC	56,55	43,45	40,39	5,18	3,03	57,54	6,61	16,35	1,45	0,15	17355,84	0,06	2,88	9,06	39,95	14,30	20,03	99,19	99,19	39,68
Rama	RAC	14,95	85,05	81,80	0,09	3,17	9,22	7,96	19,77	0,41	0,04	18221,99	0,04	0,68	2,56	28,35	17,32	27,34	119,33	119,33	168,83
Semilla	RAI	66,74	33,26	23,26	2,21	0,99	68,61	7,89	20,11	0,58	0,25	11901,47	0,50	3,89	3,63	18,27	13,47	7,14	118,28	118,28	118,29
Yuca																					
Cáscara	RAI	69,45	30,55	76,60	13,87	9,38	52,61	6,05	30,47	0,64	0,01	134663,27	0,02	0,99	4,00	20,08	5,97	16,65	90,69	90,69	82,20
Yuca descarte	RAI	63,98	36,02	85,32	12,82	1,89	52,18	6,00	38,67	0,36	0,02	14073,44	0,10	1,67	2,25	7,20	16,44	3,95	89,96	89,96	144,94
Hojas	RAC	39,79	60,21	85,40	7,62	6,71	39,47	4,54	44,25	3,27	0,02	13901,54	0,04	6,11	20,40	18,45	11,98	32,46	68,04	68,04	12,07
Tallos	RAC	68,03	31,97	85,77	5,85	8,42	56,66	6,51	30,46	0,26	0,02	14321,89	0,24	1,17	1,63	30,63	27,23	18,33	97,67	97,67	217,92
Cacao																					
Hojas	RAC	17,98	82,02	77,03	20,88	2,09	45,74	5,23	36,73	1,50	0,09	13856,13	2,66	4,45	9,38	20,14	28,12	32,80	78,51	78,51	30,35
Tallos	RAC	71,68	28,32	86,44	11,17	2,39	48,39	5,56	39,95	0,69	0,02	13723,49	2,83	0,54	4,31	30,27	36,77	23,34	83,42	83,42	70,12
Frutos descarte	RAI	85,47	14,53	73,92	19,48	6,60	51,67	5,94	33,90	0,64	0,09	14112,67	5,90	2,02	4,00	25,11	14,73	25,15	89,08	89,08	80,73
Cacota	RAI	87,41	12,59	84,43	11,83	3,74	45,05	5,18	41,04	0,68	0,03	13959,88	15,25	0,56	4,25	21,19	14,93	25,30	77,31	77,31	66,25
Limon																					
Poda	RAC	43,96	56,04	82,72	16,00	1,28	53,40	6,14	33,61	1,16	0,05	15182,69	0,11	0,77	7,25	34,93	22,49	21,02	92,06	92,06	46,03
Cáscara	RAI	69,43	30,57	81,94	16,15	2,91	46,63	5,36	41,87	1,04	0,02	12876,83	0,50	1,02	6,50	14,19	9,11	12,89	80,39	80,39	44,83
Mandarina																					
Poda	RAC	47,35	52,65	84,48	14,66	0,86	47,15	5,19	43,52	0,90	0,05	16038,30	0,08	0,77	5,63	30,42	28,46	24,87	81,30	81,30	52,39
Cáscara	RAI	70,19	29,81	81,45	16,10	2,45	45,12	5,42	42,19	1,26	0,07	15464,73	0,50	7,23	7,88	23,39	13,36	13,27	77,79	77,79	35,81
Naranja																					
Poda	RAC	34,49	65,51	83,09	16,11	0,80	40,92	4,70	45,87	1,19	0,03	14441,08	0,04	1,23	7,44	30,64	27,08	25,75	70,55	70,55	34,39
Cáscara interior	RAI	69,99	30,01	89,00	8,74	2,26	49,59	5,70	40,05	1,01	0,04	13694,74	0,37	1,30	6,31	24,55	13,54	13,37	85,50	85,50	49,10
Cáscara exterior	RAI	69,30	30,70	81,68	14,98	3,16	47,17	5,42	41,95	1,09	0,06	13806,38	0,15	1,83	6,81	23,72	14,04	10,65	81,33	81,33	43,28

ANEXO C. Medición de pH.

1. Calibrar el pH-metro con las soluciones tampón.
2. Una vez calibrado el pH-metro, introducir el electrodo a la muestra a analizar.
3. Esperar que se estabilice el valor mostrado en el pH-metro
4. Registrar el dato.
5. Lavar el electrodo con agua destilada y guardarla en la solución correspondiente para evitar daños en el equipo.
6. Medir el pH de las muestras. Después de cada medición realizar el lavado con agua destilada para garantizar la lectura adecuada del electrodo.

ANEXO D. Ácidos grasos volátiles (AGV) y Alcalinidad total (AT).

1. Centrifugar en tubos falcón de 50 ml entre 20 y 30 mL de muestra a 5000 rpm durante 30 minutos.
2. Depositar el sobrenadante en un vaso precipitado.
3. Medir el pH inicial.
4. A 5 mL de muestra adicionar 25 mL de agua destilada.
5. Llevar el vaso precipitado a la plancha de agitación junto a un agitador magnético.
6. Medir nuevamente el pH. Si este mayor a 6,5 agregar HCl 0,1N hasta 6,5.
7. Iniciar la titulación con HCl 0,1N hasta un pH de 3,0. Anotar el volumen utilizado.
8. Pasar la muestra a un balón de destilación.
9. Ajustar el balón al equipo de destilación y calentar con una estufa hasta la ebullición por 2 minutos.
10. Desmontar el balón de la destilación y ponerlo sobre hielo para generar un choque térmico.
11. Depositar en el vaso de precipitado y llevar nuevamente a la plancha de agitación con el agitador magnético.
12. Medir el pH y llevarlo hasta 6,5 con NaOH 0,1N. anotar el volumen utilizado.

ANEXO E. Base de datos recolectada en la zona de estudio.

FINCA	CARACTERÍSTICAS GENERALES																		
	TERRENO		SECTOR PECUARIO					SECTOR AGRÍCOLA											
	HÚMEDAD	DESNIVEL (msnm)	CLASIFICACIÓN DE GANADO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN SITIO	TIPO ALIMENTACIÓN	USO DE ESTIERCOL	USO DE LOS RESIDUOS	TIPO DE CULTIVO	AREA SEMBRADA (Ha)	N° PLANTAS	COSECHAS ANUALES	FRECUENCIA DE PODA (año)	LARGO ENTRE PLANTAS (m)	ANCHO ENTRE PLANTAS (m)	PLANTAS POR (Ha)	RENDIMIENTO (Ton/Ha)	PRODUCCIÓN (Kg/año)	TIPO DE RESIDUOS
1	Húmedo	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Compostaje natural	Banano	6	1000	todo el año	2	3	3	1111,11	5,70	34200	Hojas Tallos
									Cítricos	6	1000	2	2	7	7	204,08	11,70	70200	Chupones Hojas
									Agucate	6	1000	2	1	7	7	204,08	5,90	35400	Injertos Cogollos
									Yuca	0,5	500	1	NA	1	1	10000,00	11,00	5500	NA
									Cacao	5	5000	3	2	3	3	1111,11	0,50	2500	Chupones Gajos
4	Húmedo	550-800	Avicola	30	Descubierto	Concentrado Maíz Purina	NA	Compostaje natural	Cítricos	9,4	300	2	NA	5	5	400,00	11,70	109980	Chupones Brotes
									Agucate	9,4	150	2	NA	DIS	DIS	15,96	5,90	55460	Injertos Frutos de desecho
									Cacao	4	4000	2	0,5	3	3	1111,11	0,50	2000	Hojas Tallos
5	Húmedo	500-700	Bovino	10	Descubierto	Pastoreo Cacota	NA	Alimentacion de los animales	Cítricos	5	300	2	NA	DIS	DIS	60,00	11,70	58500	NA
			Porcino	1	Cubierto	Residuos domesticos			Agucate	5	300	2	Na	DIS	DIS	60,00	5,90	29500	NA
									Cacao	5	3500	2	2	3	3	1111,11	0,50	2500	Tallos Hojas Brotes
12	Húmedo	800-900	Bovino	5	Descubierto	Pastoreo	Abono	Compostaje natural	Maracuya	0,75	400	4	4	6	3	555,56	25,27	18953	Tallos Hojas Gajos
			Equino	1	Descubierto	Pastoreo	Abono		Cítricos	2	300	1	1	6	5	333,33	11,70	23400	Hojas
									Agucate	0,02	20	2	NA	5	5	400,00	5,90	118	NA
									Cacao	2	1800	2	1	4	3,5	714,29	0,50	1000	Tallos Hojas Injertos
3	Húmedo	400-1100	Bovino	20	Descubierto	Pastoreo	Abono	Compostaje natural	Guanabana	10	15	1	NA	DIS	DIS	1,50	12,77	127700	NA
									Banano	2	2000	todo el año	NA	3	3	1111,11	5,70	11400	Hojas
									Agucate	10	200	1	NA	DIS	DIS	20,00	5,90	59000	NA
									Cacao	10	800	2	1	3	3	1111,11	0,50	5000	Chupones Injertos

13	Húmedo	980-1000	NA	NA	NA	NA	NA	Compostaje natural	Banano	0,54	600	todo el año	4	3	3	1111,11	5,70	3078	Hojas
									Cítricos	1,5	260	2	3	6,5	6,5	236,69	11,70	17550	Hojas
									Cacao	5	5000	2	2	3	3	1111,11	0,50	2500	Tallos Hojas
14	Húmedo	1000	NA	NA	NA	NA	NA	Compostaje (10% de los residuos)	Banano	1	1000	todo el año	2	3	3	1111,11	5,70	5700	Hojas
									Café	1,2	7000	1	NA	1,7	1,5	3921,57	1,03	1236	Colinos NA
									Cacao	0,5	300	2	1	4	4	625,00	0,50	250	Tallos Gogollos Hojas
9	Húmedo	1200	Bovino	2	Descubierto	Pastoreo	NA	Compostaje natural	Café	1	3000	1	NA	1,5	1	6666,67	1,03	1030	NA
									Cacao	0,18	200	2	1	3	3	1111,11	0,50	90	Tallos Hojas
7	Húmedo	700-1200	Bovino	2	Descubierto	Pastoreo	NA	Compostaje natural	Banano	0,25	200	todo el año	4	2	2	2500,00	5,70	1425	Hojas Vastago
									Yuca	0,4	300	1	NA	1	1	10000,00	11,00	4400	NA
			Avicola	8	Descubierto	Concentrado	NA		Cítricos	2	450	2	2	7,5	7,5	177,78	11,70	23400	Chupones Gajos
						Maíz			Cacao	5	3000	2	1	3	3	1111,11	0,50	2500	Tallos Hojas
10	Húmedo	1000-1700	Bovino	15	Descubierto	Pastoreo(90%)	Abono	Alimentacion animal (100% cacota)	Café	1,35	6000	1	NA	1,5	1,5	4444,44	1,03	1391	NA
						Pasto de corte	Compostaje	Compostaje (30% de poda)	Cacao	2	1500	2	2	3,33	3,33	900,00	0,50	1000	Tallos Hojas Cacota

*NA: El agricultor No aplica

ANEXO F. Potencial energético en el área de estudio.

FINCA	TIPO DE RESIDUOS	FACTOR RESIDUO	HÚMEDAD	P _r (kg/año)	Y _r (ton residuo seco/ton residuo)	MASA DE RESIDUO (ton/año)	PCI (KJ/Kg)	PE por residuo (GJ/año)	PE por finca (GJ/año)
1	Hojas	1,00	94,54	1867,32	0,05	1,87	7862,64	14,68	299,28
	Tallo	5,00	93,62	2181,96	0,06	10,91	8836,40	96,40	
	Chupones	0,08	41,93	40765,14	0,58	3,10	15220,69	47,16	
	Hojas	0,04	14,95	30107,70	0,85	1,20	18221,99	21,94	
	Injertos	0,06	56,55	15381,30	0,43	0,92	17355,84	16,02	
	Cogollos	-	-	-	-	-	-	-	
	NA	-	-	-	-	-	-	-	
	Chupones	2,83	71,68	708,00	0,28	2,00	13723,49	27,50	
Gajos	2,66	17,98	2050,50	0,82	5,45	13856,13	75,58	209,14	
Chupones	0,08	41,93	63865,39	0,58	4,85	15220,69	73,88		
Brotos	-	-	-	-	-	-	-		
Injertos	0,06	56,55	24097,37	0,43	1,45	17355,84	25,09		
Frutos de desecho	0,04	14,95	47168,73	0,85	1,89	14686,40	27,71		
Hojas	2,83	71,68	566,40	0,28	1,60	13723,49	22,00	178,65	
Tallo	2,66	17,98	1640,40	0,82	4,36	13856,13	60,46		
NA	-	-	-	-	-	-	-		
NA	-	-	-	-	-	-	-		
5	Tallo	2,66	17,98	2050,50	0,82	5,45	13856,13	75,58	178,65
	Hojas	2,83	71,68	708,00	0,28	2,00	13723,49	27,50	
	Brotos	2,66	17,98	2050,50	0,82	5,45	13856,13	75,58	
	Tallo	-	-	80,58	3680,58	0,19	0,00	18971,5	
12	Hojas	-	-	81,09	3584,09	0,19	0,00	19060,5	0
	Gajos	0,08	41,93	13588,38	0,58	1,03	15220,69	15,72	87,18
	Hojas	-	-	-	-	-	-	-	
	NA	-	-	-	-	-	-	-	
	Tallos	2,66	17,98	820,20	0,82	2,18	13856,13	30,23	
	Hojas	2,83	71,68	283,20	0,28	0,80	13723,49	11,00	
	Injertos	2,66	17,98	820,20	0,82	2,18	13856,13	30,23	
	NA	-	-	-	-	-	-	-	
NA	-	-	-	-	-	-	-	156,05	
Hojas	1,00	94,54	622,44	0,05	0,62	7862,64	4,89		
NA	-	-	-	-	-	-	-		
3	Chupones	2,66	17,98	4101,00	0,82	10,91	13856,13	151,15	116,18
	Injertos	1,00	94,54	168,06	0,05	0,17	7862,64	1,32	
	Hojas	0,08	41,93	10191,29	0,58	0,77	15220,69	11,79	
	Tallos	2,66	17,98	2050,50	0,82	5,45	13856,13	75,58	
	Hojas	2,83	71,68	708,00	0,28	2,00	13723,49	27,50	
13	Hojas	1,00	94,54	311,22	0,05	0,31	7862,64	2,45	28,82
	Colinos	5,00	93,62	363,66	0,06	1,82	8836,40	16,07	
	NA	-	-	-	-	-	-	-	
	Tallos	2,66	17,98	205,05	0,82	0,55	13856,13	7,56	
	Gogollos	2,83	71,68	70,80	0,28	0,20	13723,49	2,75	
14	NA	-	-	-	-	-	-	-	3,71
	Tallos	2,66	17,98	73,82	0,82	0,20	13856,13	2,72	
	Hojas	2,83	71,68	25,49	0,28	0,07	13723,49	0,99	
9	Hojas	1,00	94,54	77,81	0,05	0,08	7862,64	0,61	123,42
	Vastago	5,00	93,62	90,92	0,06	0,45	8836,40	4,02	
	NA	-	-	-	-	-	-	-	
	Chupones	0,08	41,93	13588,38	0,58	1,03	15220,69	15,72	
	Gajos	2,66	17,98	2050,50	0,82	5,45	13856,13	75,58	
	Tallos	2,83	71,68	708,00	0,28	2,00	13723,49	27,50	
7	NA	-	-	-	-	-	-	-	68,03
	Tallos	2,66	17,98	820,20	0,82	2,18	13856,13	30,23	
	Hojas	2,83	71,68	283,20	0,28	0,80	13723,49	11,00	
	Cacota	15,25	87,41	125,90	0,13	1,92	13959,88	26,80	
TOTAL						95,72	TOTAL		1270,46

ANEXO G. Determinación del volumen de biogás por el método de desplazamiento alcalino.

1. Preparar una solución 0,5N en una botella de 500mL.
2. Utilizar un soporte para sujetar la botella boca abajo.
3. Introducir una aguja hipodérmica con una manguera corta por el tapón de butilo de la botella y colocar una probeta debajo de esta.
4. Utilizar una manguera larga a la cual se le colocan dos agujas hipodérmicas a cada extremo.
5. Verificar que el regulado de flujo de la manguera este cerrado. enseguida, conectar a un extremo la botella de NaOH y al otro lado conectar el biorreactor que contiene la muestra.
6. Deslizar el regulador de flujo permitiendo que el flujo de biogás se desplace a través la manguera llegando hasta la botella de 500mL con la solución de NaOH.
7. El CO₂ reacciona con la solución quedando atrapado en ella y dejando pasar la cantidad de CH₄ presente. El volumen desplazado a través de la manguera llega a una probeta.
8. Medir el volumen desplazado el cual es equivalente al volumen de CH₄ producido.

ANEXO H. Proceso seguido en la determinación del PBM.

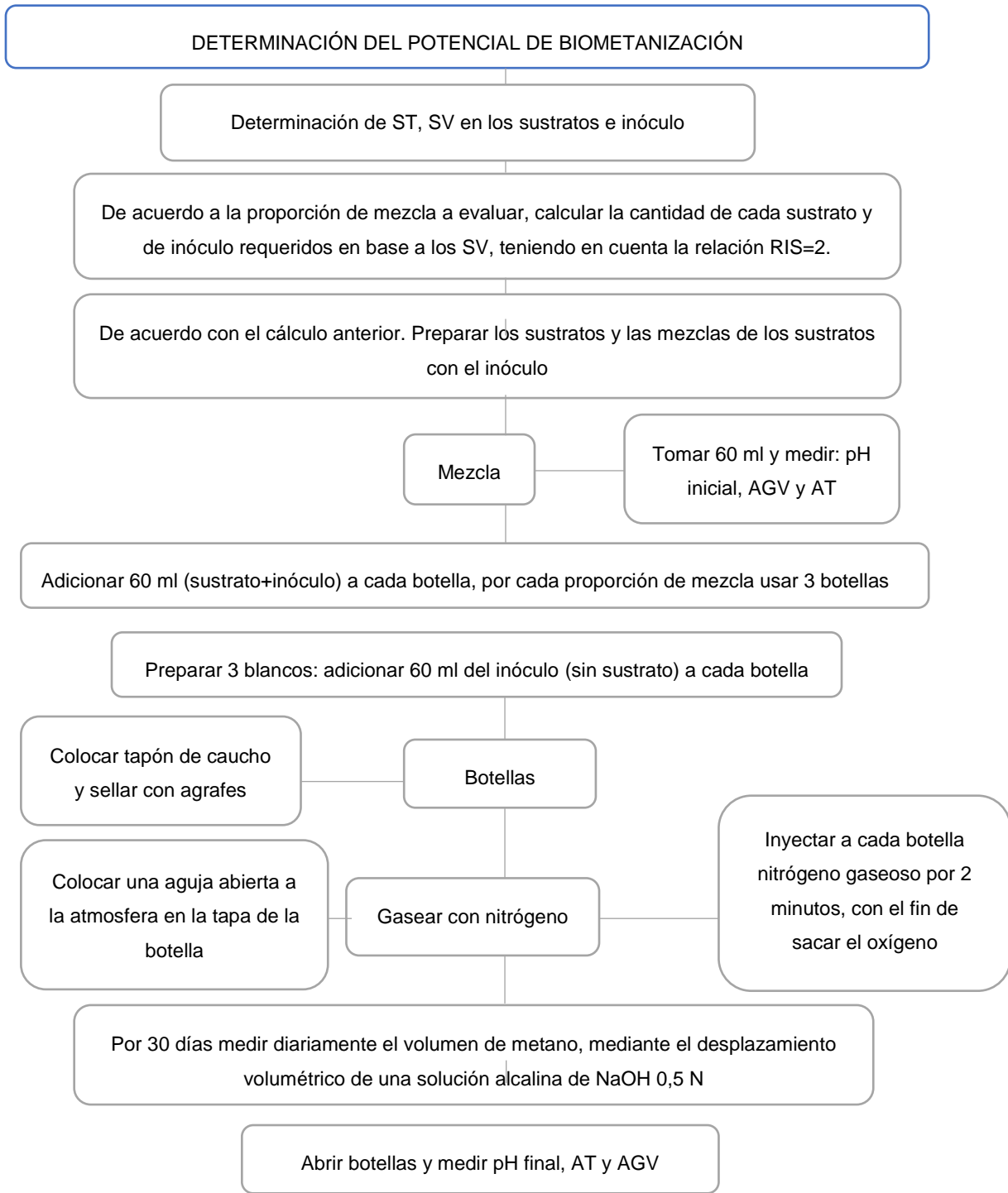


Figura 4. Esquema del procedimiento para determinar el potencial de biometanización de un determinado sustrato.

ANEXO I. Balance de masa material lignocelulósico

Cultivo	Residuo	Extractos Acuoso (%peso)	Extractos Orgánicos (%peso)	Lignina (%peso)	Holocelulosa (%peso)	Ceniza (%peso)	Total (%)
Maracuyá	Hojas	32,045	10,892	35,390	16,824	4,85	100,000
	Tallos	21,890	4,482	45,227	24,311	4,09	100,000