



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS: CÁSCARA DE PLÁTANO, CASCARILLA DE ARROZ Y BAGAZO DE CAÑA MEDIANTE PROCESOS DE BIODIGESTIÓN Y COMBUSTIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA MECÁNICO

**GABRIELA SALOMÉ SALGADO ORTIZ**  
gabriela.salgado@epn.edu.ec

**DIRECTOR:**  
**DR. GUERRERO VÍCTOR HUGO**  
victor.guerrero@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR:**  
**DR. ORDOÑEZ MALLA FREDDY**  
freddy.ordonez@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita **GABRIELA SALOMÉ SALGADO ORTIZ**, bajo nuestra supervisión.

---

Dr. Víctor Hugo Guerrero

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Dr. Freddy Ordoñez Malla

**CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **Gabriela Salomé Salgado Ortiz**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Gabriela Salomé Salgado Ortiz

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres Libia y Marco,  
que con su ejemplo de sacrificio y perseverancia  
me han enseñado a no rendirme hasta cumplir mis metas.

A mi amada hija Sofía,  
por quien cada día me esfuerzo por ser mejor,  
Tú, eres mi mayor orgullo.

A mis hermanos Mishel y Marco,  
con quienes he compartido hermosas vivencias,  
más que mis hermanos son mis mejores amigos.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme dado la vida en el seno de una familia unida y amorosa.

A mis padres Libia y Marco, por su amor y apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, han sido el mejor ejemplo que he podido desear. Les agradezco por ser tan pacientes conmigo y ayudarme a levantar en cada caída, por celebrar junto a mí cada uno de mis triunfos que son por y para ustedes.

A la ingeniera Cristina Almeida por su orientación y consejos para la realización de este proyecto de titulación.

## INDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCION	1
Objetivo General	2
Objetivos Específicos	2
1. MARCO TEORICO	3
1.1. Importancia del sector agrícola en el Ecuador	3
1.2. Producción agrícola en Ecuador	3
1.3. Datos estadísticos de la producción de arroz, banano y caña de azúcar	4
1.4. Cantidad de residuos orgánicos agrícolas generados	5
1.5. Opciones de manejo de residuos	6
1.5.1. Opciones con aprovechamiento ganadero	6
1.5.2. Opciones con aprovechamiento agrícola	6
1.5.3. Opciones con aprovechamiento energético	7
1.5.4. Biodigestión	8
2. METODOLOGIA	11
2.1. Determinación de la cantidad de sólidos fijos, sólidos volátiles y sólidos totales	12
2.1.1. Sólidos totales (ST)	12
2.1.2. Sólidos volátiles (SV)	13
2.1.3. Sólidos fijos (SF)	13
2.2. determinación del porcentaje de humedad	14
2.3. Medición de ph	15
2.4. Determinación del porcentaje de nitrógeno	15
2.5. Medición de alcalinidad	16
2.6. Determinación del poder calórico de los residuos	16
2.7. Determinación de la calidad del inóculo	18
2.8. Construcción de biodigestores y medición del metano obtenido	19
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23

3.1. Resultados de la caracterización de residuos	23
3.1.1. Cáscara de plátano	24
3.1.2. Cascarilla de arroz	24
3.1.3. Bagazo de caña	24
3.2. Poder calórico	25
3.3. Biodigestión	28
3.3.1. Calidad del inóculo	28
3.3.2. Obtención y medición del metano	29
3.4. Uso de la energía generada a partir de los residuos estudiados	31
4. CONCLUSIONES	34
5. BIBLIOGRAFÍA	35

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Distribución de suelo por su uso en Ecuador_____	3
Tabla 1.2. Superficie en la que se cosecha banano y producción en el 2016_____	4
Tabla 1.3. Superficie en la que se cosecha caña de azúcar y producción en el 2016____	5
Tabla 1.4. Superficie en la que se cosecha arroz y producción en el 2016_____	5
Tabla 1.5. Composición química del biogás_____	10
Tabla 3.1. Datos experimentales encontrados de la caracterización de residuos_____	23
Tabla 3.2. Datos referenciales para la caracterización de residuos_____	23
Tabla 3.3. Poder calórico de residuos agrícolas_____	26
Tabla 3.4. Poder calórico y energía gastada en el secado de residuos_____	27
Tabla 3.5. Resultado del ensayo de potencial de biometanización_____	29
Tabla 3.6. Carbohidratos, proteínas y lignocelulosa en los residuos_____	30
Tabla 3.7. Promedio de la producción anual en Ecuador de plátano, arroz y caña de azúcar_____	31
Tabla 3.8. Promedio aproximado anual de residuos agrícolas_____	31
Tabla 3.9. Energía obtenida por el proceso de combustión_____	32
Tabla 3.10. Promedio mensual de energía obtenida de cada residuo por biodigestión__	33

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1. Esquema de los procesos de la digestión anaerobia_____	9
Figura 2.1. Sistema de medición de biogás armado_____	21
Figura 2.2. Medición del biogás obtenido_____	21
Figura 3.1. Resultado del ensayo de actividad metanogénica del inóculo_____	28
Figura 3.2. Producción de biogás_____	30

## RESUMEN

El sector agrícola contribuye de manera significativa a la economía global, representando el 3,6% del PIB a nivel mundial, siendo los países en vías de desarrollo los que aportan mayoritariamente. Sin embargo, los residuos generados después de la cosecha y el procesamiento de productos agrícolas no son adecuadamente gestionados ni aprovechados. Con esta problemática en mente, en este trabajo se estudia la valorización de tres de los residuos más abundantes en varios países latinoamericanos: cascarilla de arroz, bagazo de caña y cáscara de plátano. El objetivo es evaluar diversos elementos relacionados con la valorización de estos residuos para generar energía mediante biodigestión y combustión. En este documento se realiza la caracterización energética de estos residuos mediante dos métodos. Se determinó el poder calórico de los residuos, utilizando una bomba calorimétrica. También a escala laboratorio, se realizó la biodigestión de cada residuo para cuantificar el metano producido durante 38 días. En el proceso de biodigestión se utilizó lodo anaerobio como inóculo. Como resultado se obtuvo que el residuo con mayor generación de energía mediante el proceso de digestión anaerobia es la cáscara de plátano con  $1.179 \pm 120$  mL de metano por cada gramo de sustrato, a su vez la cascarilla de arroz presentó la mayor cantidad de energía mediante el proceso de combustión con un poder calórico de  $14,56 \pm 3,52$  kJ/g. Estos resultados obtenidos permiten establecer la factibilidad de utilizar estos residuos y establecer propuestas de valoración y uso en la producción de energía.

**Palabras clave:** valorización energética, residuos agrícolas, gestión de residuos, combustión, biodigestión.

## ABSTRACT

The agricultural sector contributes significantly to the global economy, representing 3.6% of GDP worldwide, with developing countries being the ones that contribute mostly. However, waste generated after harvest and processing of agricultural products is not properly managed or used. With this problem in mind, this paper studies the valorization of three of the most abundant waste in several Latin American countries: rice husk, cane bagasse and banana peel. The objective is to evaluate various elements related to the recovery of these wastes to generate energy through biodigestion and combustion. In this document the energy characterization of these wastes is carried out by two methods. The heat value of the residues was determined, using a calorimetric pump. Also, on a laboratory scale, the biodigestion of each residue was performed to quantify the methane produced for 38 days. In the biodigestion process anaerobic sludge was used as inoculum. As a result, it was obtained that the residue with the greatest energy generation through the anaerobic digestion process is the banana peel with  $1,179 \pm 120$  mL of methane per gram of substrate, in turn the rice husk presented the greatest amount of energy through the combustion process with a caloric power of  $14.56 \pm 3.52$  kJ / g. These results allow us to establish the feasibility of using this waste and establish proposals for valuation and use in energy production.

**Keywords:** energy recovery, agricultural waste, waste management, combustion, biodigestion.

# **VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS: CÁSCARA DE PLÁTANO, CASCARILLA DE ARROZ Y BAGAZO DE CAÑA MEDIANTE PROCESOS DE BIODIGESTIÓN Y COMBUSTIÓN**

## **INTRODUCCIÓN**

Todo proceso agrícola genera residuos vegetales ya sea durante el desarrollo del cultivo o en la cosecha. Entre los usos que se dan a estos residuos lastimosamente no se destacan ni un correcto aprovechamiento, ni una correcta gestión [1].

Para el 2012, se estimó que las áreas o zonas urbanas produjeron cerca de 1,3 millones de toneladas de residuos por año. Suponiendo un aumento de residentes urbanos para el 2025 de 4,3 millones, se estima un incremento de 2,2 millones de toneladas de residuos sólidos por año. A nivel mundial, al rededor del 46% de estos residuos son residuos sólidos orgánicos [2].

El Ecuador es considerado un país altamente agrícola, ya que la agricultura forma parte importante en su economía, representando un 9,24% del PIB para el 2018 [3]. Entre los productos más cultivados en Ecuador se encuentran: plátano, arroz, caña de azúcar, flores, maíz, cacao, etc. Al ser un país agrícola, posee una gran variedad de especies de biomasa, y se genera una gran cantidad de residuos agrícolas. Sin embargo, estos residuos no se utilizan como fuentes de energía, ya sea por la poca tecnología o falta de implementación de políticas respecto al tema. La mayor parte de esta materia orgánica es quemada o desechada en botaderos a cielo abierto. Actualmente, la única biomasa utilizada con el fin de obtener energía en el país es la leña y el bagazo de caña, a través de la combustión directa para calentar y cocinar, especialmente en zonas rurales para la leña y en los ingenios azucareros para el bagazo de caña [4].

Sobre la base de estas problemáticas y la necesidad de incluir energías alternativas de forma gradual y sostenible en la matriz energética del país, se presenta la valorización energética de tres de los residuos agrícolas de mayor producción en el Ecuador (cáscara de plátano, bagazo de caña y cascarilla de arroz). Actualmente algunos de estos residuos prácticamente no tienen un uso significativo. Así, para la cascarilla de arroz según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) el 35% es utilizado en la industria florícola y criaderos de animales, el 65% restante es quemado o desechado [5]. El bagazo de caña tiene un uso más importante en la industria azucarera, pues con los residuos obtenidos de la caña se genera energía, abono para cultivos y celulosa para elaboración

de papel [6]. En este estudio se considera este residuo para establecer una comparación con los otros dos residuos estudiados.

Uno de los objetivos del proyecto presentado es determinar que proceso (combustión o biodigestión) genera mayor cantidad de energía a partir de estos tres residuos agrícolas. De esta manera se determinará un valor energético para cada uno de ellos.

## **Objetivo general**

Valorizar energéticamente los residuos agrícolas de alta producción en Ecuador: cáscara de plátano, cascarilla de arroz y bagazo de caña mediante procesos de biodigestión y combustión.

## **Objetivos específicos**

- Caracterizar de manera físico-química los residuos agrícolas de mayor producción en el Ecuador (cáscara de plátano, bagazo de caña y cascarilla de arroz).
- Determinar la cantidad de biogás producido por la cáscara de plátano, el bagazo de caña y la cascarilla de arroz.
- Determinar el poder calorífico de la cáscara de plátano, el bagazo de caña y la cascarilla de arroz.
- Determinar la factibilidad del uso de estos residuos en la generación de energía.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Importancia del sector agrícola en Ecuador

Ecuador se ha formado fundamentalmente como un país agrícola y petrolero, destacándose en el sector agrícola con la producción de cacao, café, flores, azúcar, arroz, entre otros. [7].

Actualmente la agricultura forma parte importante de la economía del país, aportando un 9,24% al PIB en 2018, convirtiéndose en el sexto sector que aporta a la producción en Ecuador [3]. A nivel mundial Ecuador ocupa el lugar 69 dentro de la mayor economía de exportación en el mundo, siendo sus principales productos de exportación: petróleo crudo (29% del total de exportaciones), plátanos (18%), crustáceos (16%), pescado procesado (6,1%), flores cortadas (4,4%), granos de cacao (3,2%). Los principales países a los que Ecuador exporta son: Estados Unidos, Vietnam, Chile, Panamá y Rusia [8].

## 1.2. Producción agrícola en Ecuador

Según el INEC, en el 2016 en Ecuador existía un área de 12.385.973 hectáreas de suelo utilizadas para: cultivos permanentes, cultivos transitorios, tierra en descanso, pastos cultivados, pastos naturales, páramo, montes, bosques y otros usos. En la tabla 1.1 se muestra la distribución del uso de suelos.

Tabla 1.1. Distribución de suelo por su uso en Ecuador.

<b>Uso de los suelos</b>	<b>Área utilizada [ha]</b>
<b>Cultivos permanentes</b>	1.430.497
<b>Cultivos transitorios</b>	904.224
<b>Tierra en descanso</b>	129.268
<b>Pastos cultivados</b>	2.447.634
<b>Pastos naturales</b>	677.911
<b>Páramo</b>	332.418
<b>Montes y bosques</b>	5.675.402
<b>otros usos</b>	757.791

(Fuente:[9])

### 1.3. Datos estadísticos de la producción de plátano, caña de azúcar y arroz en Ecuador

En Ecuador el promedio de la producción anual de banano para el año 2016 se encontraba entre 6 y 7,2 millones de toneladas métricas, de las cuales aproximadamente el 89% de la producción se exporta y el 11% restante se lo utiliza para consumo interno [10]. Las provincias de mayor producción son: Los Ríos, Guayas y El Oro, entre ellas suman el 84,9% de la superficie total cosechada de este producto [9]. En la tabla 1.2 se muestra la superficie cosechada según las provincias y su rendimiento promedio en producción de banano.

Tabla 1.2. Superficie de cosecha de banano y producción en el 2016.

<b>Provincia</b>	<b>Superficie cosechada [ha]</b>	<b>Producción [Tm]</b>
<b>Los Ríos</b>	61.937	2.822.585
<b>Guayas</b>	48.805	2.139.384
<b>El Oro</b>	42.340	1.075.395
<b>Resto de provincias</b>	27.254	492.312

(Fuente: [9])

La producción de caña de azúcar para el año 2016 llegó a 8.661.609 toneladas métricas [11]. Su cosecha está principalmente localizada en la región costa del país. Sin embargo, en algunas provincias de la región sierra también se cultiva. Las provincias que se destacan en la producción de caña de azúcar son Guayas en la región costa y Loja, Cañar e Imbabura en la región sierra [9]. En la tabla 1.3 se puede observar la superficie de cosecha de caña de azúcar y su producción promedio en las principales provincias en las que se cultivó para el año 2016.

La producción anual de arroz en el Ecuador para el 2016 fue de 1.534.537 toneladas métricas [12]. Las provincias del Guayas, Los Ríos y Manabí aportan con la mayor cosecha de este producto; Guayas y Los Ríos producen 67,47% y 27,47% de la producción respectivamente [9]. La tabla 1.4 muestra la superficie de cosecha y su producción promedio en las principales provincias que producen arroz.

Tabla 1.3. Superficie de cosecha de caña de azúcar y producción en el 2016.

<b>Provincias</b>	<b>Superficie cosechada [ha]</b>	<b>Producción [Tm]</b>
<b>Guayas</b>	87.255	6.961.050
<b>Loja</b>	7.052	777.902
<b>Cañar</b>	6.039	477.134
<b>Resto de provincias</b>	4.315	445.523

(Fuente: [9])

Tabla 1.4. Superficie de cosecha de arroz y producción en el 2016.

<b>Provincias</b>	<b>Superficie cosechada [ha]</b>	<b>Producción [Tm]</b>
<b>Guayas</b>	237.217	1.035.344
<b>Los Ríos</b>	107.277	421.483
<b>Manabí</b>	13.740	55.536
<b>Resto de provincias</b>	7.959	22.175

(Fuente: [9])

## **1.4. Cantidad de residuos orgánicos agrícolas generados**

En el 2015 el área utilizada para la agricultura representó el 37,43% a nivel mundial. Posterior al consumo de estos productos se generan residuos que se utilizan de diferentes maneras según el país y región. En países en vías de desarrollo se estima que el 80 % de los residuos agrícolas son quemados, el 15 % sirve como alimento para animales, el 4,5 % se reincorpora al suelo sin haberse realizado una descomposición previa y el 0,5 % restante se usa como materia prima en industrias como la papelera, aglomerados, compostaje, etc. [13].

Adicionalmente en Ecuador, estudios realizados en el año 2014 por el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS) indicaron que de 221 Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADs), 160 disponen sus desechos en botaderos a cielo abierto y los 61 GADs restantes disponen sus residuos en rellenos sanitarios [14]. En el 2013 la generación de residuos sólidos en el país fue aproximadamente de 4.139.512 Tm/año, de los cuales 61,4% fueron desechos orgánicos. Se estimó que para el 2017 Ecuador generaría 5.546.921 Tm/año [15]

## **1.5. Opciones de manejo de residuos**

Los residuos producidos por el sector agrícola representan trabajo y fuente de costos adicionales en su almacenamiento, disposición o eliminación para el productor [16]. Esta biomasa presenta características para poder ser aprovechadas en diversas ramas, como: ganadera, agrícola y energética.

### **1.5.1. Opciones de aprovechamiento ganadero**

Dentro del sector ganadero los residuos agrícolas pueden aprovecharse como fuente de alimentación, especialmente de animales rumiantes, ya que la mayoría de estos residuos presentan nutrientes adecuados para el consumo animal. Esto permite reducir los costos de producción por concepto de alimentación de animales, representando una clara mejora en la rentabilidad [16]. El residuo a ser utilizado en la alimentación de animales depende del ganado. Por ejemplo, con la cascarilla de arroz triturada se puede alimentar al ganado bovino y ovino, con la cáscara de plátano y bagazo de caña se puede alimentar al ganado porcino.

### **1.5.2. Opciones con aprovechamiento agrícola**

Los métodos usados para el manejo de residuos orgánicos, desde un punto de vista de aprovechamiento agrícola lo comprenden el compostaje y vermicompostaje, generando abono de muy buena calidad, con altos niveles de materia orgánica y otros elementos asimilables y beneficiosos para las plantas [2].

El compostaje constituye una técnica en la que se promueve la biodegradación de la materia orgánica por la acción de microorganismos, generando la transformación de ésta en otras formas químicas que forman el compost. El compost no contiene patógenos ni microorganismos nocivos, presentando un período termofílico en el proceso de degradación, en el que la temperatura alcanza alrededor de los 70 °C generándose un proceso de pasteurización del compost [2].

Otro de los métodos que se destacan en el manejo de residuos orgánicos con aprovechamiento en el sector agrícola es el vermicompostaje, conocido también por el nombre de lombricultura o alternativa biotécnica. Se refiere al uso de gusanos para realizar el compostaje, dando como resultado humus o abono orgánico. Se produce a temperatura

ambiente usando gusanos específicos, por ejemplo, *Eisenia foétida*, que conjuntamente con microorganismos producen la degradación de los residuos [2].

### **1.5.3. Opciones de aprovechamiento energético**

La naturaleza de cada uno de los residuos generados por el sector agrícola los hace idóneos para su uso en el aprovechamiento energético, por lo que se han desarrollado diferentes opciones enfocadas a este tipo de aprovechamiento. Por ejemplo, existen técnicas que aprovechan su poder calórico, como la incineración de residuos; también existen técnicas que aprovechan la composición de estos residuos, como la biodigestión y la obtención de biocombustibles a partir de los mismos [18].

La digestión anaerobia es una técnica que aprovecha los residuos agrícolas que presentan altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable y un buen potencial de producción de biogás [20].

Con el fin de aprovechar este potencial existen diferentes opciones a ser consideradas. Una de ellas es disponer los residuos en rellenos sanitarios, donde estos son acumulados y compactados en un lugar previamente preparado para evitar filtraciones y separar de manera eficaz los lixiviados, controlando así los impactos ambientales. Con la implementación de las instalaciones adecuadas se puede recolectar biogás [18].

La recolección del biogás es un tipo de tecnología de aprovechamiento energético de residuos, con un impacto considerable. Los rellenos sanitarios son una práctica adoptada y aceptada en países en vías de desarrollo y, en muchos casos, la única opción para tratar y almacenar residuos recolectados en forma controlada [18].

La producción de biogás de un relleno sanitario se forma por la digestión anaerobia de materia orgánica en el cuerpo del relleno, que es como un tipo de reactor biológico sobredimensionado. Este gas, al ser atrapado puede ser utilizado en la generación de energía [18].

Otra opción a considerarse al aprovechar el potencial biodegradable de los residuos es la producción de biogás en un reactor, por ejemplo, estudios realizados muestran que en un reactor de 13 m<sup>3</sup> con una alimentación de 7.060 kg de residuos sólidos urbanos (RSU) con una composición de materia orgánica en el orden de 50%, produjo 240 m<sup>3</sup> de biogás con un porcentaje de metano de 60%. De acuerdo con este estudio, se aproxima que la producción de biogás en un relleno sanitario con un volumen de 300 m<sup>3</sup> y alimentado con

una carga de 215 toneladas de RSU tendría una velocidad estimada de producción promedio de 50 Nm<sup>3</sup>/día [21].

## **1.6. Incineración**

Al enfocarse en el aprovechamiento energético de los residuos agrícolas una de las primeras técnicas estudiadas es la incineración. Este es un proceso en el cual se queman los residuos de manera controlada dentro de un sistema específico. Este proceso presenta varios objetivos como: reducir el volumen y la masa de los residuos para convertirlos químicamente en materiales inertes. Además, permite la recuperación de energía aprovechando su calor [18].

Durante el proceso de incineración se generan gases de combustión que contienen la mayor parte de la energía disponible de los combustibles en forma de calor. El calor excesivo de la combustión se puede usar para generar vapor y producir electricidad, para calentamiento/enfriamiento por redes o para suministrar vapor a procesos industriales cercanos [18].

Sin embargo, al considerar esta técnica como alternativa en la gestión de residuos se debe tener en cuenta el aspecto ambiental, incluyendo las emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero, lo que hace que la incineración de residuos requiera tecnología altamente compleja, implicando grandes inversiones y grandes costos operativos. El montaje de una planta es una decisión importante y hay que tener en cuenta el nivel de energía, la contribución económica general y la generación de emisiones a la atmósfera [19].

## **1.7. Biodigestión**

La biodigestión o digestión anaerobia se presenta como otro proceso en la gestión de residuos agrícolas con el objetivo de generar energía, ya que la materia orgánica biodegradable puede aprovecharse como generadora de biogás [22].

La digestión anaerobia es la descomposición de materia orgánica mediante microorganismos. Esta descomposición ocurre en forma natural en condiciones carentes de oxígeno y se puede utilizar en condiciones controladas para generar biogás. El proceso se realiza en un reactor hermético, llamado digestor anaeróbico, para proveer las condiciones favorables para que los microorganismos conviertan la materia orgánica (sustrato) en biogás y un residuo sólido-líquido llamado biol que puede ser utilizado como fertilizante orgánico [18].

La digestión anaeróbica es un proceso dado por reacciones bioquímicas que dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro etapas:

1. Hidrólisis: 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.
2. Etapa fermentativa o acidogénica: 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.
3. Etapa acetogénica: Se le conoce también como acidogénesis intermedia en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO<sub>2</sub>.
4. Etapa metanogénica: En esta etapa metabólica el CH<sub>4</sub> es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, 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 [23].

En la figura 1.1 se presenta un esquema donde se aprecia cada una de las etapas y lo que ocurre en cada una de ellas.

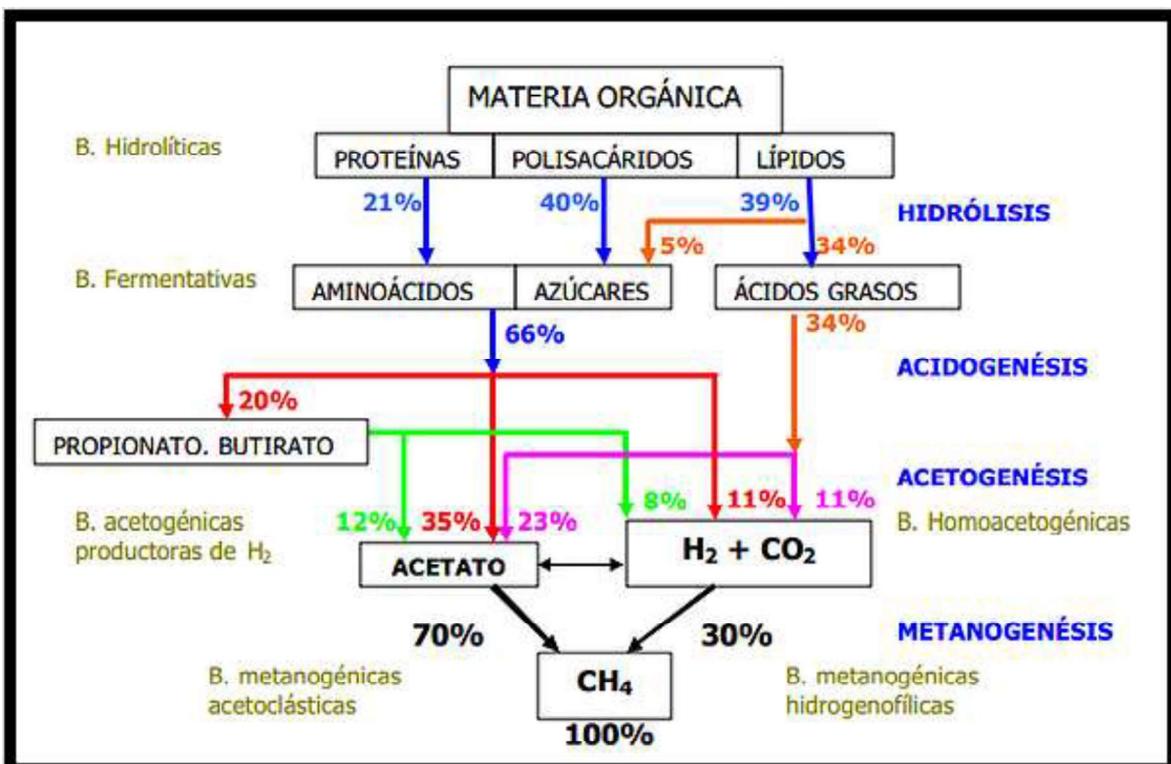


Figura 1.1. Esquema de los procesos de la digestión anaerobia.  
(Fuente: [22])

El biogás es una mezcla de diferentes gases que se pueden convertir en energía térmica y/o eléctrica. El gas metano inflamable (CH<sub>4</sub>), al ser uno de los principales componentes del biogás es el portador principal de la energía y su contenido varía entre 50 y 75% dependiendo del sustrato y de las condiciones de operación. El poder calorífico del biogás es aproximadamente una tercera parte del de gas natural (5,5 a 7,5 kWh/m<sup>3</sup>) [18].

En la tabla 1.5 se detalla cada uno de los gases que conforman el biogás con su porcentaje en la composición del mismo.

Tabla 1.5. Composición química del biogás.

Componente	Fórmula	Composición (%)
<b>Metano</b>	CH <sub>4</sub>	40-70
<b>Dióxido de carbono</b>	CO <sub>2</sub>	30-60
<b>Hidrogeno</b>	H <sub>2</sub>	0,1
<b>Nitrógeno</b>	N <sub>2</sub>	0,5
<b>Monóxido de carbono</b>	CO	0,1
<b>Oxigeno</b>	O <sub>2</sub>	0,1
<b>Sulfuro de hidrógeno</b>	H <sub>2</sub> S	0,1

(Fuente: [24])

En Ecuador se han implementado varios proyectos con esta tecnología. En la ciudad de Quito, la Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito (EMASEO) recibe un promedio de 2.000 toneladas de basura a diario. Con el fin de aprovechar estos residuos como materia prima se implementó la planta de generación de energía eléctrica a partir del biogás que se captura en el relleno sanitario del Inga. El proyecto empezó en enero del 2016, a la fecha la planta capta entre 24,5 millones de metros cúbicos anuales de biogás, con lo que se beneficia mensualmente a 25.000 hogares de la ciudad de Quito [25].

Entre las diferentes opciones de manejo de residuos agrícolas con aprovechamiento energético uno de los requisitos básicos para seleccionar una técnica con la cual valorar cada residuo energéticamente es la caracterización adecuada de cada uno de ellos. Los datos obtenidos de la caracterización dan una indicación en la idoneidad del residuo para las diferentes opciones de valorización [19].

## 2. METODOLOGÍA

Para realizar la valorización energética de los residuos seleccionados, se realizó una investigación experimental que se resume a continuación:

- Paso 1: Se realiza la caracterización de los residuos a valorizar (cáscara de plátano, cascarilla de arroz, bagazo de caña). En este paso se miden los siguientes parámetros: sólidos fijos, sólidos volátiles, sólidos totales, porcentaje de humedad, pH porcentaje de nitrógeno y alcalinidad.
- Paso 2: Se realizan pruebas en la bomba calorimétrica para determinar el poder calórico de cada residuo.
- Paso 3: Se analizan sólidos volátiles, fijos y totales del inóculo a utilizarse (lodos anaerobios) con el fin de conocer el estado del mismo. Simultáneamente se realizan análisis de actividad metano-génica para determinar la calidad del inóculo.
- Paso 4: Se arman los biodigestores y se realiza la biodigestión de cada residuo.
- Paso 5: Se determina el porcentaje de metano obtenido de la biodigestión de cada uno de los residuos.
- Paso 6: Se comparan los resultados obtenidos de la incineración y la biodigestión de cada residuo, considerado el proceso para la valorización energética más eficiente.
- Paso 7: Se valoriza energéticamente cada uno de los residuos gracias a los resultados obtenidos.

La determinación de las características de los residuos sólidos se realizó identificando diferentes parámetros asociados a los procesos de combustión y biodigestión. Estos parámetros fueron:

- Cantidad de sólidos fijos, sólidos volátiles y sólidos totales
- Porcentaje de humedad
- pH
- Concentración de nitrógeno
- Alcalinidad.

Parámetros como: sólidos fijos, sólidos volátiles y sólidos totales, porcentaje de humedad y pH, se cuantificaron en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica. El análisis de la concentración de nitrógeno y alcalinidad de las muestras, se realizó en los laboratorios de AGROCALIDAD.

Los ensayos se realizaron en duplicado, para poder obtener el promedio y la desviación estándar de los resultados en cada ensayo.

## 2.1. Determinación de la cantidad de sólidos fijos, sólidos volátiles y sólidos totales

Para este análisis se utilizó el método gravimétrico detallado en “*Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*”, con base en la norma APHA sección 2540 G [26].

### 2.1.1. Sólidos totales (ST)

Son todos los residuos sólidos que se obtienen después de la evaporación y secado de una muestra determinada. Para su cuantificación se requiere:

Materiales:

Crisoles tarados, desecador, pinzas para crisol

Equipos:

Balanza analítica RADWAG modelo AS220.R2, estufa MEMMERT modelo II15

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Tarar los crisoles en la estufa a 550 °C por un periodo de una hora.
2. Pesar los crisoles tarados (A).
3. Depositar en cada crisol la muestra a analizar y pesar (B).
4. Llevar las muestras a la estufa a una temperatura entre 103 °C a 105 °C durante 24 horas.
5. Sacar el crisol, llevarlo al desecador y dejar que se enfríe hasta temperatura ambiente.
6. Pesar las muestras (C).

Para realizar los cálculos de la concentración de los ST se usó la ecuación 2.1.

$$ST \left[ \frac{mg}{kg} \right] = \frac{(C-A)*1000}{(B-A)} \quad (2.1)$$

Concentración de sólidos totales

Donde A es el peso del crisol vacío [mg], B es el peso del crisol más muestras húmeda [mg] y C es el peso del crisol más muestra seca [mg].

### 2.1.2. Sólidos Volátiles (SV)

Representa el peso perdido en la muestra después de su calcinación a 550°C. para su cuantificación se requiere:

Materiales:

Crisoles tarados, desecador, pinzas para crisol.

Equipos:

Balanza analítica RADWAG modelo AS220.R2, mufla WISETHERM

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Llevar los crisoles que contienen las muestras con los ST (C) a una mufla a 550°C durante una hora.
2. Apagar la mufla y dejar que la temperatura baje mínimo a 100°C.
3. Sacar los crisoles y pasarlos al desecador hasta que lleguen a temperatura ambiente.
4. Pesar los crisoles (D).

Para realizar los cálculos de la concentración de los SV se usó la ecuación 2.2.

$$SV \left[ \frac{mg}{kg} \right] = \frac{(C-D)*1000}{(B-A)} \quad (2.2)$$

Concentración de sólidos volátiles

Donde A es el peso del crisol vacío [mg], B es el peso del crisol más muestras húmeda [mg], C es el peso del crisol más muestra seca [mg] y D es el peso del crisol más muestra calcinada [mg].

### 2.1.3. Sólidos Fijos (SF)

Son los residuos que quedan en el crisol después de la calcinación de la muestra.

Para realizar los cálculos de la concentración de los SF se usó la ecuación 2.3.

$$SF \left[ \frac{mg}{kg} \right] = D - A \quad (2.3)$$

Concentración de sólidos fijos

Donde A es el peso del crisol vacío [mg] y D es el peso del crisol más muestra calcinada [mg].

## 2.2. Determinación del porcentaje de humedad

Para este análisis se utilizó el método gravimétrico con base en la norma APHA 2540G “*Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*” [26]. Para su cuantificación se requiere lo siguiente:

Materiales:

Crisoles tarados

Equipo:

Balanza analítica ADAM modelo PW124, estufa MEMMERT modelo II15

El procedimiento seguido es el siguiente.

1. Pesar los crisoles ya tarados.
2. Colocar en los crisoles de 25 a 50 gramos de muestra.
3. Llevar las muestras a la estufa a una temperatura de 103 °C a 105°C por una hora.
4. Sacar las muestras y pesarlas.
5. Repetir los pasos 3 y 4 con intervalos de 1 hora hasta que la variación del peso de las muestras sea nula o muy baja ( $\pm 0.0004$ ).

Para el cálculo del porcentaje de humedad en las muestras se utilizó la ecuación 2.4.

$$\%h = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (2.4)$$

Porcentaje de humedad

Donde  $P_i$  es el peso inicial (antes de ingresar a la estufa) [g] y  $P_f$  es el peso final (después de salir de la estufa) [g].

### 2.3. Medición de pH

Para el cálculo del pH en las muestras se adaptó el procedimiento detallado en “*Métodos de análisis de suelos*” [27]. Se midió el pH con la ayuda del pHmetro marca OAKTON, modelo pH/CON 510 Serie. Para su cuantificación se usó:

Materiales:

Vasos de precipitado, agua destilada

Equipo

pHmetro OAKTON, modelo pH/CON 510, agitador

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Secar las muestras por 24 horas a una temperatura de 105°C y molerlas a un tamaño de 2 mm.
2. Tamizar las muestras, recuperar el material de 2mm.
3. Pesar entre 10 a 20 gramos de muestra.
4. Agregar 50 mL de agua destilada.
5. Agitar durante dos horas.
6. Introducir el electrodo del pHmetro en la parte superior de la solución.
7. Recoger los datos una vez estabilizado el pHmetro.

### 2.4. Determinación del porcentaje de nitrógeno

La medición del porcentaje de nitrógeno total se realizó por el método Dumas [28]. Para eso se utilizó:

Materiales.

Papel de estaño, apisonador

Equipo:

Balanza, equipo para medición de nitrógeno marca Vario MACRO modelo GmbH

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Secar las muestras por 24 horas a una temperatura de 105°C y pulverizarlas a un tamaño de 2 mm.
2. Pesar aproximadamente 100 mg de la muestra y cerrarla a manera de una pastilla en papel de estaño.
3. Colocar la pastilla preparada en el equipo de medición.
4. El resultado se refleja en un ordenador, el cual se da por combustión y reducción de la muestra arrojando así el porcentaje total de nitrógeno.

## **2.5. Medición de alcalinidad**

Se utilizó la técnica de medición de carbonatos y bicarbonatos. Para la implementación de esta técnica se utilizó lo siguiente:

Materiales:

Vasos de plásticos, espátulas, papel filtro, pipeta, matraz Erlenmeyer de 25 mL

Reactivos:

Fenolftaleína, verde de bromocresol

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Secar las muestras por 24 horas a una temperatura de 105°C y pulverizarlas a un tamaño de 2 mm.
2. Pesar entre 50 a 100 g de muestra.
3. Hidratar la muestra con agua desionizada, hasta formar una pasta saturada.
4. Filtrar la pasta obtenida.
5. Por titulación con fenolftaleína y verde de bromocresol se obtiene la cantidad de carbonatos y bicarbonatos de cada muestra.

## **2.6. Determinación del poder calórico de los residuos**

Se realizaron pruebas de poder calórico de cada uno de los residuos utilizando la bomba calorimétrica del Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. Durante esta prueba se usó lo siguiente:

Reactivo:

Oxígeno.

Equipos

Balanza analítica ADAM modelo PW124

Bomba calorimétrica (PARR ADIABATIC CALORIMETER)

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Secar las muestras por 24 horas a una temperatura de 105°C y triturarlas a un tamaño aproximado de 2mm.
2. Pesar el crisol de la bomba calorimétrica.
3. Pesar aproximadamente 1 g de la muestra en el crisol.
4. Cortar 10 cm de alambre de ignición y armarlo en el calorímetro haciéndolo pasar por el crisol tocando la muestra.
5. Sellar el calorímetro.
6. Llenar el recipiente de oxígeno.
7. Colocar el recipiente en el equipo y conectar los cables para la ignición.
8. Colocar la termocupla en el equipo y esperar que se estabilice.
9. Encender la ignición de la muestra.
10. Controlar la temperatura hasta que llegue a su máximo valor y registrarla.
11. Sacar el crisol del equipo y pesar las cenizas.

El cálculo del poder calórico para cada una de las muestras se da por la ecuación 2.5.

$$PC \left[ \frac{J}{g} \right] = \frac{k*(T_f - T_i) - Q*(L_0 - L_f)}{m_o - m_c} \quad (2.5)$$

Fórmula para determinar el poder calórico

Donde: k es la constante del calorímetro 3.670 [J/g],  $T_f$  es la temperatura final [K],  $T_i$  es la temperatura inicial [K], Q es el factor de calor de combustión del alambre de ignición 2,69 [J/cm],  $L_0$  es la longitud inicial del alambre 10 [cm],  $L_f$  es la longitud final del alambre 0 [cm],  $m_o$  es la masa inicial [g],  $m_c$  es la masa de las cenizas [g].

## 2.7. Determinación de la calidad del inóculo

Existen diferentes análisis con los que se puede determinar la de calidad del inóculo, entre ellos la medición de pH, el rango de sólidos volátiles presentes, medición de ácidos grasos volátiles, etc. Otro indicador de calidad es su actividad con diferentes sustratos estandarizados como glucosa, acetato, propionato. [32].

Debido a la naturaleza del inóculo a utilizarse (lodos anaerobios) se escogen como indicadores de calidad el análisis de sólidos volátiles, pH y actividad metanogénica.

Los sólidos volátiles se determinan con el mismo procedimiento detallado en la sección 2.2. Para considerar que el inóculo se encuentre en una etapa óptima para la biodigestión sus sólidos volátiles deben encontrarse en un rango entre 10 a 20 g SV/L [29].

La actividad metanogénica se determinó con el procedimiento propuesto en “Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition”, para lo cual se incubó el inóculo por 24 horas a 37 °C, previo al inicio del ensayo [30].

Para esto se utilizó lo siguiente:

Materiales:

Botellas ámbar de 120 mL con un tapón de nitrilo, embudo, micropipeta de 1 mL, probeta de 500 mL, mangueras de PVC, válvula de 3 vías, agujas hipodérmicas, jeringa graduada de 10 mL.

Equipo:

Horno incubador.

Reactivos:

Acetato de sodio anhídrido, hidróxido de sodio (0,01N), fenolftaleína, nitrógeno 99.99% de pureza.

El procedimiento es el siguiente:

1. Colocar 100 mL de inóculo en tres botellas ámbar.
2. En las tres botellas restantes colocar 99 mL de inóculo más 1 mL de acetato de sodio.
3. Gasificar cada botella con nitrógeno durante un minuto y taparlas sellándolas con teflón.
4. Llevar las botellas al horno incubadora a una temperatura de 37 °C.

5. En un recipiente preparar una solución alcalina con hidróxido de sodio y agua destilada.
6. Añadir a la solución tres gotas de fenolftaleína.
7. Colocar en la solución la probeta de 500 mL invertida y fijarla
8. Encerar la probeta.
9. Colocar dentro de la probeta invertida el sistema armado con las mangueras de PVC, la válvula de tres vías y la aguja para realizar la medición.
10. Medir la producción de gas de cada una de las botellas cada 12 horas durante 3 días (antes de realizar la medición agitar cada una de las botellas).
11. Registrar la temperatura ambiente en cada medición.

## **2.8. Construcción de los biodigestores y medición del metano obtenido**

Para armar cada uno de los biodigestores se adoptó el procedimiento detallado en los protocolos propuestos en “Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays” y “Towards a standardization of biomethane potential test”. Para esto se incubó el inóculo por 24 horas a 37 °C, previo al inicio del ensayo [31, 32].

Los estudios en los biodigestores se realizaron por triplicado para cada uno de los sustratos (cáscara de plátano, bagazo de caña y cascarilla de arroz). Del mismo modo, se efectuó un estudio por triplicado en el que se usó únicamente el inóculo, el cual sirvió como blanco para realizar los cálculos del biogás obtenido por cada residuo. Es decir, se utilizaron 12 biodigestores tipo Batch de 100 mL, el tiempo de retención hidráulica fue de 38 días a una temperatura de operación de 37 °C [31]. Para esta parte del trabajo se utilizó lo siguiente:

Materiales:

Botellas autoclavables de 100 mL con corcho de nitrilo, embudo

Reactivos:

Nitrógeno 99.99% de pureza

Equipo:

Horno incubador POL-EKO

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Fijar 75 mL como volumen de control.
2. Para conocer el volumen de sustrato a utilizarse se plantea un volumen fijo de inóculo y se calcula con la relación inóculo-sustrato (RIS).

El volumen de inóculo se fija en 65 mL y se utiliza una RIS de 2 con base en los SV (g SV inóculo/g SV sustrato) [32], y se calcula el volumen de sustrato a partir de la ecuación 2.6.

$$RIS = \frac{SV_{inóculo} * V_{inóculo}}{SV_{sustrato} * V_{sustrato}} \quad (2.6)$$

Fórmula de la relación inóculo-sustrato

Donde: SV son los sólidos volátiles [g SV/L] y V es el volumen [mL]

3. Añadir agua destilada para completar el volumen de control fijado, de ser necesario.
4. De la mezcla inóculo-sustrato realizar pruebas de SV y ST.
5. Gasificar cada una de las botellas con nitrógeno por un minuto y sellarlas.
6. Colocarlas en el horno incubadora a una temperatura de 37°C.

Se midió la producción de biogás a diario procurando que sea a la misma hora cada día. Para la medición de biogás producido se utilizó:

Materiales:

Probeta de 500 mL, mangueras de PVC, válvula de 3 vías, agujas hipodérmicas, jeringa de 10 mL graduada.

Reactivos:

Hidróxido de sodio, fenolftaleína.

La medición se realiza mediante desplazamiento de una columna de solución de sosa caustica que atrapa el CO<sub>2</sub> presente en el biogás. Así se obtiene una medición aproximada del volumen de metano producido por cada uno de los biodigestores. Este procedimiento se realizó de acuerdo con la norma APHA sección 2720 B especificada en "*Standard methods for the examination of wáter and wastewater*" [33].

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. En un recipiente preparar una solución de hidróxido de sodio 0,01N con agua destilada.
2. Añadir a la solución tres gotas de fenolftaleína.
3. Perforar la probeta por la parte inferior para introducir una manguera de diámetro externo de 4 mm y pegar la manguera a la probeta.
4. Colocar en la solución la probeta de 500 mL invertida y fijarla con un cierre plástico.

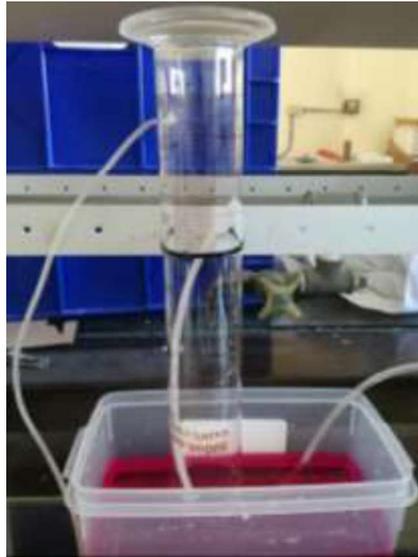
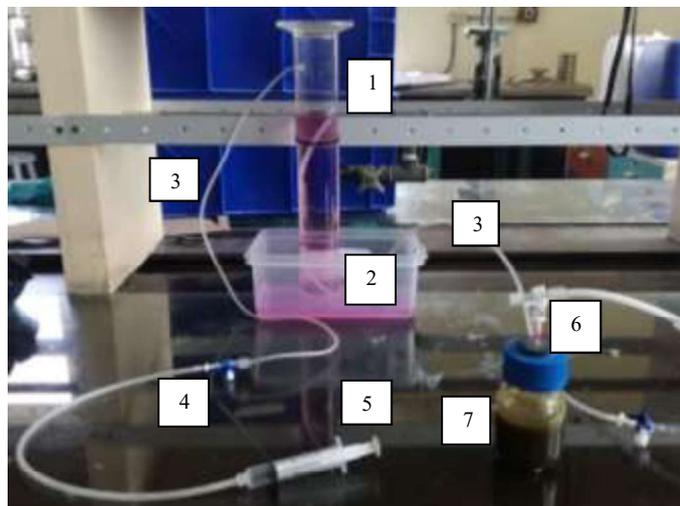


Figura 2.1. Sistema de medición de biogás armado.  
(Fuente: Propia)

5. Encerar la probeta, elevando una columna de solución en ella hasta un número específico.
6. Medir la producción diaria de gas de cada una de las botellas, procurando que la medición sea siempre a la misma hora (antes de realizar la medición agitar cada una de las botellas). Este paso se realiza por un mínimo de 28 días.



1 Probeta invertida
2 solución de NaOH
3 mangueras de PVC
4 llave de tres vías
5 jeringa graduada
6 aguja hipodérmica
7 botella autoclavable de 200 mL

Figura 2.2. Medición del biogás obtenido.  
(Fuente: Propia)

7. Registrar la temperatura ambiente en cada medición.
8. Al terminar las mediciones, medir el volumen final de la mezcla y la cantidad de SV, ST y SF.
9. Medir el pH de la mezcla al finalizar la biodigestión.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección presenta los resultados obtenidos en este estudio para la valoración de cada residuo agrícola para generar energía. Se inicia mostrando los datos de la caracterización de los residuos, para proseguir con los datos del poder calórico de cada uno y la cantidad de metano obtenido de la biodigestión de los residuos. Finalmente se determina cual es el mejor proceso de recuperación energética de los residuos y cuál de los residuos presenta un mayor valor energético.

#### 3.1. Resultados de la caracterización de residuos

En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los resultados obtenidos experimentalmente de la caracterización de cada uno de los residuos estudiados y datos referenciales encontrados en bibliografía para su comparación respectivamente.

La caracterización de cada residuo se realizó por duplicado de las muestras, de estos resultados se calculó el promedio y la desviación estándar.

Tabla 3.1. Datos experimentales encontrados de la caracterización de residuos.

Parámetro	Unidades	Cáscara de plátano (2 muestras)		Cascarilla de arroz (2 muestras)		Bagazo de caña (2 muestras)	
		Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
% Humedad	%	88,404	0,967	8,58	0,295	51,725	3,811
% Nitrógeno	%	0,838	0,017	0,422	0,047	0,249	0,012
Sólidos totales [g]	[g ST/kg]	45,739	3,639	92,681	0,146	57,467	5,39
Sólidos volátiles [g]	[g SV/kg]	41,711	3,735	72,118	0,765	56,19	5,207
Sólidos fijos [g]	[g SF/kg]	4,028	0,114	20,564	0,619	1,277	0,183
pH	-	5,645	0,007	6,37	0	4,665	0,177
Alcalinidad	carbonatos	[meq/l]	0	0	0	0	0
	Bicarbonatos	[meq/l]	0	0	9,6	0	1,7

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Datos referenciales para la caracterización de residuos.

Parámetros	% humedad	% nitrógeno	pH	referencia
cáscara de plátano	86,6	1,03	5,85	[34], [35], [36]
cascaquilla de arroz	8-15	0,38-1,88	-	[37]
bagazo de caña	48-50	0,23	5,8	[38], [39]

(Fuente: Propia)

Se analiza cada uno de los parámetros obtenidos en referencias bibliográficas y se compara con los resultados obtenidos, con el fin de determinar la viabilidad de los residuos para ser utilizados ya sea en el proceso de combustión o digestión anaerobia.

### **3.1.1. Cáscara de plátano**

De acuerdo con la evaluación realizada en estudios anteriores, la cáscara de plátano presenta una humedad de 86,6 % [34]. Por otro lado, en este trabajo los análisis arrojaron una humedad de 88,4 %, con lo que se observa una diferencia mínima al comparar los datos obtenidos experimentalmente con los bibliográficos. Asimismo, la cantidad de nitrógeno presente en el residuo según datos bibliográficos es 1,03 % [35], mientras que los valores obtenidos en la caracterización realizada fueron 0,838 %, se observó una diferencia relativamente pequeña, que podría deberse al tipo de plátano estudiado, así como también al lugar en que fue cosechado el fruto.

Otro parámetro a ser comparado con bibliografía es el pH, el cual en la caracterización realizada arrojó un resultado de 5,65, mientras que en datos bibliográficos encontrados en “La cáscara de plátano como adsorbente de metales pesados” se muestra un pH de 5,85 [36]. Al comparar los datos experimentales obtenidos con los referenciales se observó que la diferencia es mínima, la cáscara de plátano presenta un pH ligeramente ácido.

### **3.1.2. Cascarilla de arroz**

Según estudios realizados anteriormente de la cascarilla de arroz, el porcentaje de humedad del residuo presenta un rango entre 8 a 15% al estar expuesto a la intemperie en época no lluviosa. El resultado obtenido en la caracterización realizada fue de 8,83 %, con lo que se observa que la humedad del residuo se encuentra dentro del rango encontrado en datos bibliográficos. Por otro lado, el porcentaje de nitrógeno presente en la cascarilla de arroz y arrojado por la caracterización fue de 0,42 %, el cual se encuentra dentro del rango presentado en bibliografía que es de entre 0,38 y 1,88 % [37].

### **3.1.3. Bagazo de caña**

El promedio de humedad en el bagazo de caña está entre 48 a 50 %. Sin embargo, este parámetro se ve afectado por la velocidad y eficiencia de la molienda y el lugar en el que se cultiva la caña de azúcar [38]. El valor obtenido en la caracterización realizada muestra un porcentaje de humedad de 51,73 %, el cual se encuentra cerca de los rangos encontrados en datos bibliográficos.

Se tomó como referencia para los valores de porcentaje de nitrógeno y pH a los datos obtenidos de la caracterización del bagazo de caña realizados para el estudio del “Uso de

cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado". En dicho estudio los valores obtenidos son 0,23 % de nitrógeno total y 5,8 para el pH. Los datos obtenidos de la caracterización realizada para este proyecto dieron valores de 0,25 % y 4,67, respectivamente, siendo entonces comparables con los valores referenciales [39].

La caracterización de los residuos permite conocer cual es el mejor proceso para ser valorizados energéticamente. Para aprovechar al máximo el contenido energético de los residuos por medio de la combustión se debe mantener un contenido de humedad inferior al 15% [40]. Por esta razón, para residuos que presentan un porcentaje de humedad mayor al 15% como el bagazo de caña ( $51,725\% \pm 3,811$ ) y la cáscara de plátano ( $88,404\% \pm 0,967$ ), es necesario realizar un proceso de secado previo a la combustión, con lo que su valor energético se reduce. Por otro lado, en el proceso de digestión anaerobia de los residuos se contemplan parámetros como su pH y contenido de nitrógeno, que están asociados a la cantidad de proteínas presentes en el residuo, lo que facilita su degradación presentando una mayor producción de biogás [41].

### **3.2. Poder calórico**

Como se mencionó anteriormente, para poder obtener un aprovechamiento máximo de los residuos por procesos térmicos es necesario que estos presenten un porcentaje de humedad no mayor al 15 %. Esto se debe a que al utilizar residuos con alto contenido de humedad el balance energético general se ve afectado negativamente. La presencia de agua disminuye el valor calórico del residuo y aumentan los gases de combustión. Las emisiones de monóxido de carbono aumentan a medida que aumenta la concentración de agua en el residuo [42].

De acuerdo con los datos referenciales se estima un valor energético en el proceso de secado en los residuos de alto porcentaje de humedad. Se presentan valores de poder calórico obtenidos en muestras húmedas y secas, con lo que se facilita la aproximación del balance energético general [42].

Por otro lado, hasta donde se conoce, no existen proyectos en los que se considere la cáscara de plátano como un residuo para ser utilizado en un proceso de generación de energía por combustión. Esto se debe al alto porcentaje de humedad que presenta.

Las pruebas de poder calórico para cada uno de los residuos estudiados se los realiza en muestras secas.

Para la cascarilla de arroz el poder calorífico encontrado en bibliografía es 15,27 [kJ/g] [43], mientras que el promedio de las pruebas realizadas en la bomba calorimétrica del

Laboratorio de Termodinámica de la Escuela Politécnica Nacional fue  $14,56 \text{ [kJ/g]} \pm 3,52$ . Este valor se asemeja mucho con el de la bibliografía.

Las pruebas realizadas al bagazo de caña para medir su poder calorífico determinaron un valor de  $15,62 \text{ [kJ/g]} \pm 0,21$ . Este valor presenta una diferencia significativa con el valor referencial de  $19,99 \text{ [kJ/g]}$  [43]. Esto se debe al porcentaje de humedad presente en el residuo en el momento de realizar la prueba, el cual se ve afectado por la velocidad, eficiencia de la molienda y el lugar en el que se cultiva la caña de azúcar [38].

En la tabla 3.3 se presentan los valores bibliográficos y valores medidos del poder calórico de los residuos estudiados para establecer una comparación.

Tabla 3.3. Poder calórico de residuos agrícolas.

<b>Residuo</b>	<b>Poder calórico medido [kJ/g]</b>	<b>Poder calórico referencial [kJ/g]</b>	<b>Referencia</b>
<b>Cáscara de plátano</b>	$16,12 \pm 1,06$	-	-
<b>Cascarilla de arroz</b>	$14,56 \pm 3,52$	15,27	[43]
<b>Bagazo de caña</b>	$15,62 \pm 0,21$	19,99	[43]

(Fuente: [43])

Para poder comparar entre si los valores obtenidos del poder calórico de cada residuo es necesario realizar un balance general en la energía que se puede obtener de los residuos, restando la energía requerida para el proceso de secado.

En la tabla 3.4 se muestran los valores medidos del poder calórico de cada residuo y un valor aproximado de la energía gastada en el secado de los residuos que presentaron un alto porcentaje de humedad.

Antes de analizar los valores obtenidos es necesario recalcar que para dos de los residuos estudiados (cáscara de plátano y bagazo de caña) fue necesario someterlos a un proceso de secado, lo que requirió un gasto energético en el residuo haciendo que su valor energético final disminuya.

Al ser comparados los valores obtenidos entre sí, se observó que el residuo que presenta una mayor generación de energía fue la cáscara de plátano con  $16,12 \pm 1,06 \text{ [kJ/g]}$ . Sin embargo, es necesario mencionar que para realizar las pruebas en la bomba calorimétrica

fue necesario someter al residuo a un tratamiento de secado. Para este tratamiento se llevó el residuo al horno a una temperatura de 105 °C por un periodo de 6 horas. Restando el gasto energético dedicado al secado del residuo, se obtiene un resultado del valor energético final del residuo de  $1,82 \pm 1,06$  [kJ/g], resultando ser el residuo con menor valor energético por el proceso de combustión, haciéndolo el menos idóneo para ser aprovechado energéticamente por este proceso.

Tabla 3.4. Poder calórico y energía gastada en el secado de residuos.

<b>Residuo</b>	<b>Poder calórico medido [kJ/g]</b>	<b>Gasto energético en el secado [kJ/g]</b>	<b>Referencia</b>	<b>Calor final del residuo [kJ/g]</b>
<b>Cáscara de plátano</b>	$16,12 \pm 1,06$	14,3	[42]	$1,82 \pm 1,06$
<b>Cascarilla de arroz</b>	$14,56 \pm 3,52$	-	-	$14,56 \pm 3,52$
<b>Bagazo de caña</b>	$15,62 \pm 0,21$	1,7	[42]	$13,92 \pm 0,21$

Tras el balance general de energías, la cascarilla de arroz y el bagazo de caña muestran el mayor valor energético por el proceso de combustión, estos alcanzan valores iguales de  $14,56 \pm 3,52$  [kJ/g] y  $13,92 \pm 0,21$  [kJ/g] respectivamente. Por lo tanto, estos residuos se convierten en la mejor opción en el proceso de recuperación energética por combustión de los tres residuos estudiados.

El análisis realizado en la bomba calorimétrica se realizó para cada residuo bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. Por ello se puede afirmar que la diferencia observada entre los valores de generación de energía de cada residuo se da por su naturaleza y su contenido de humedad.

### **3.3. Biodigestión**

#### **3.3.1. Calidad del Inóculo**

Con el fin de acortar los tiempos de biodegradación de los sustratos, es necesario utilizar inóculo, ya que este proporciona una comunidad microbiana capaz de digerir una gran variedad de moléculas orgánicas [32].

El inóculo a utilizarse se escogió de acuerdo con la caracterización de los sustratos, por ejemplo, para sustratos lignocelulósicos se considera mejor el rumen o estiércol bobino como inóculo [57]. Al considerar que los residuos presentan en su caracterización diferentes valores para cada parámetro medido, se escogió como inóculo lodos anaerobios previamente digestados.

La calidad del inóculo utilizado se mide en la cantidad de sólidos volátiles (SV) que presenta y en su coeficiente de actividad metanogénica (AME) específica en términos de demanda química que oxígeno (DQO). Los rangos óptimos de SV van entre 10 y 20 g SV/kg [29] y el DQO entre 0,01 y 0,04 g DQO/g SV [44].

Los resultados obtenidos en la caracterización del inóculo utilizado mostraron un contenido promedio de sólidos volátiles de 10,41 g SV/kg, estando dentro del rango de referencia. En el ensayo de AME el inóculo presentó una actividad metanogénica específica de 0,033 g DQO/g ad-día, encontrándose dentro del rango óptimo para su uso en digestión anaerobia. Considerando la bibliografía analizada para ambos parámetros medidos, se considera que el lodo utilizado como inóculo es apto para biodegradar los sustratos utilizados.

En la figura 3.1 se observan los resultados del ensayo de actividad metanogénica, que muestra la curva de producción de metano acumulado del inóculo en términos de demanda química de oxígeno (DQO).

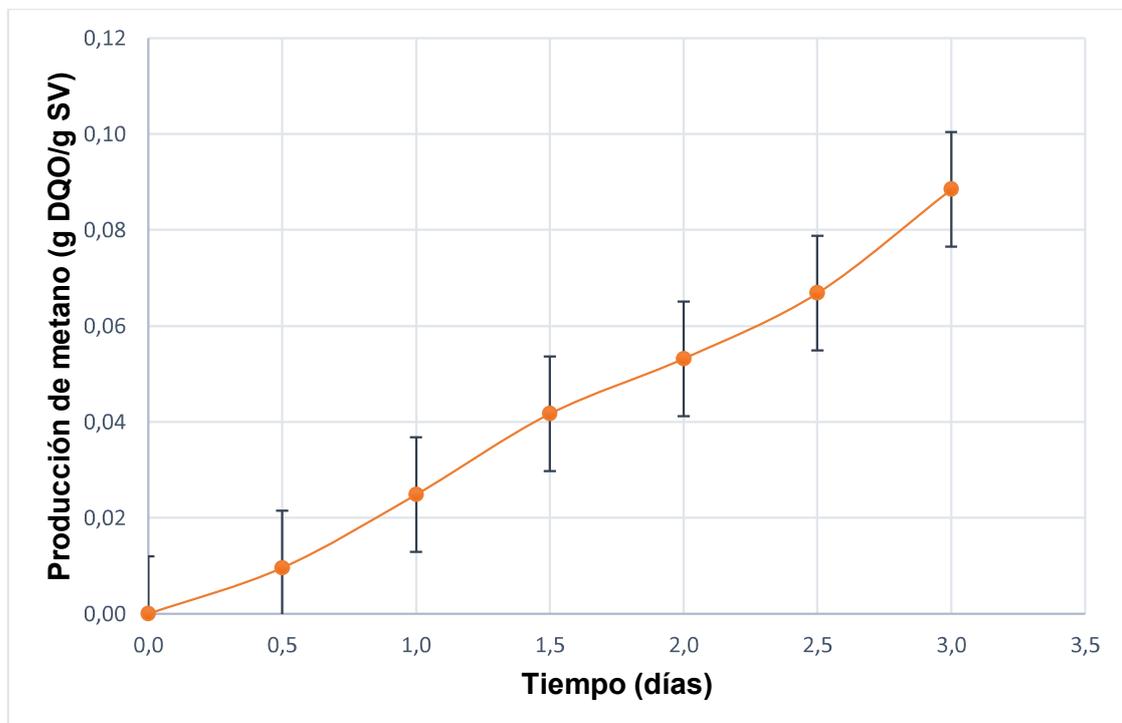


Figura 3.1. Resultados del ensayo de actividad metanogénica del inóculo.

(Fuente: Propia)

### 3.3.2. Obtención y medición del metano

Se obtuvo la producción acumulada de metano promedio de cada residuo por medio del ensayo del potencial de biometanización (PBM), en un tiempo de retención hidráulica de 38 días, por medio de un proceso termofílico a una temperatura de 37°C, se eligió un proceso termofílico dado que en datos bibliográficos se explica que las condiciones termofílicas son generalmente utilizadas para procesos de digestión anaerobia pues este se encuentra en un rango en el que se encuentra la temperatura corporal, presentando las mejores condiciones para las comunidades bacterianas que se presentan en el inóculo. Estos resultados se detallan en la tabla 3.5., del mismo modo se presentan valores referenciales para su comparación.

Tabla 3.5. Resultado del ensayo de potencial de biometanización.

<b>Residuo</b>	<b>Producción acumulada de metano [NmL/g SV]</b>	<b>Producción de metano referencial [NmL/g SV]</b>	<b>Referencia</b>
<b>Cáscara de plátano</b>	1.179,96 ± 120,66	294	[45]
<b>Cascarilla de arroz</b>	139,88 ± 18,70	44	[46]
<b>Bagazo de caña</b>	407,02 ± 61,77	298	[47]

NmL/g SV: mililitros normalizado por gramo de sólidos volátiles.

Al establecer una comparación de los valores obtenidos experimentalmente con los valores teóricos se observa una diferencia bastante significativa en la producción de metano del proceso de digestión anaerobia de cada residuo. Esto se atribuye a que el proceso de digestión anaerobia de residuos depende de varios factores, en gran parte la composición química tanto del inóculo utilizado, como del sustrato añadido [48].

Se observan mejores resultados con biomasa que presente características como: alto porcentaje de humedad, nutrientes que ayudan a la biodegradación del sustrato como una adecuada relación carbono/nitrógeno (100:1,75), un pH ácido entre un rango de 6 y 8, etc. [48]. Es necesario mencionar que cada una de estas características deben presentarse en el sustrato, pues no se observa una mejora en la producción de biogás si solo una característica está presente.

Esto explica la diferencia entre los valores, ya que la naturaleza de cada residuo depende del lugar en el que ha sido cosechado el producto ya que esta se ve influenciado por la

calidad de suelo en el cual ha sido cultivado, el clima, etc.; también es necesario mencionar que los porcentajes en la composición química de los residuos varían dependiendo del tiempo transcurrido a partir de la cosecha [41].

Al no realizarse análisis completos de la relación carbono/nitrógeno, proteínas, lípidos, etc. la comparación con los datos bibliográficos varían pues los residuos utilizados pueden no presentar las mismas características a los residuos encontrados en bibliografía.

En la figura 3.2 se muestran los resultados de los PBMs que corresponden a la producción acumulada de metano para cada uno de los residuos en un tiempo de retención hidráulica de 38 días. Al comparar los resultados obtenidos entre sí se observó que el residuo que presentó la mayor producción de metano es la cáscara de plátano, con un valor de  $1179,96 \pm 120,66$  NmL/g SV, mientras que el residuo que presentó la menor producción fue la cascarilla de arroz, con  $139,88 \pm 18,7$  NmL/g SV, esta diferencia se debe a la naturaleza de cada sustrato, pues sustratos con mayor cantidad de carbohidratos y proteínas presentan mayor producción de biogás, mientras que sustratos lignocelulósicos se digieren lenta y difícilmente, por lo tanto, para mejorar su digestibilidad a menudo se usan pretratamientos físicos y químicos [41].



Figura 3.2. Producción de biogás; cada punto corresponde al promedio de tres biodigestores.  
(Fuente: Propia)

En la tabla 3.6 se muestra la cantidad en porcentaje de carbohidratos, proteínas y lignocelulosa para cada residuo estudiado encontrado bibliográficamente, con el fin de avalar la discusión en la digestibilidad anaeróbica de los residuos.

Tabla 3.6. Carbohidratos, proteínas y lignocelulosa en los residuos.

<b>Residuo</b>	<b>Carbohidratos</b>	<b>Proteínas</b>	<b>Lignina</b>	<b>Referencia</b>
<b>Cáscara de plátano</b>	26,2	5,19	29,87	[49]
<b>Cascarilla de arroz</b>	26,5 – 29,8	1,9 – 3,0	6,66	[50 - 51]
<b>Bagazo de caña</b>	40,76	-	20,7	[47]

Si bien se analizó ciertas características de los residuos estudiados, es necesario mencionar que esto nos brinda un indicador en la valorización energética de cada sustrato, sin embargo, los resultados obtenidos no son concluyentes para brindar un enfoque cualitativo para cada residuo. Existen diferentes técnicas que podrían ampliar el estudio energético de los residuos agrícolas. Con lo que este estudio brindó información preliminar respecto al valor energético que puede darse a los residuos agrícolas en el Ecuador.

### **3.4. Uso de la energía generada a partir de los residuos estudiados**

Con base en los datos expuestos en el punto 1.3 se calcula la producción anual de cada uno de los residuos estudiados.

En la tabla 3.7 se muestra la producción anual en Ecuador de plátano, arroz y caña de azúcar.

Tabla 3.7 Promedio de la producción anual en Ecuador de plátano, arroz y caña de azúcar.

<b>Plátano</b> <b>[Tm]</b>	<b>Arroz</b> <b>[Tm]</b>	<b>Caña de azúcar</b> <b>[Tm]</b>
6.282.104	1.066.614	9.030.073

(Fuente: [9])

Respecto a la generación de residuos de banano, de la producción total en Ecuador, un 3,5 % se destina al consumo humano interno; otro 3,5 % al consumo animal y el 3 % para la industria. La fruta de banano contiene 60 % de pulpa y 40 % de cáscara; es decir, de

una caja de banano de 18,14 kg se desperdician 7,25 kg. Tomando como referencia estos datos se puede calcular aproximadamente la cantidad de cáscara de plátano generada anualmente [52].

Para la cascarilla de arroz, de cada cuatro toneladas de arroz se produce una tonelada de cascarilla [53].

Por último, el Centro de investigación de la caña de azúcar en el Ecuador (CINCAE) indica que como promedio anual aproximado se tiene 158.000 Tm de gabazo de caña [54].

De acuerdo con los datos consultados se obtiene el promedio aproximado anual de la generación de los residuos estudiados, los mismos que se presentan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Promedio aproximado anual de residuos agrícolas.

<b>Cáscara de plátano [Tm]</b>	<b>Cascarilla de arroz [Tm]</b>	<b>Bagazo de caña [Tm]</b>
628.210	266.653	158.000

(Fuente:[9], [54])

Con los promedios anuales de la generación de cada uno de los residuos estudiados y los resultados de las pruebas en la bomba calorimétrica, se calcula un valor aproximado de energía que se podría obtener de cada residuo mediante el proceso de combustión. Estos resultados se muestran en la tabla 3.9. En los datos presentados para el aprovechamiento energético del residuo por el proceso de combustión se consideran los residuos de la producción de arroz y de la caña de azúcar, dado que estos residuos presentaron un poder calórico que puede ser aprovechable mediante este proceso. Estos datos muestran la generación total de energía que podría obtenerse anualmente a partir de los residuos estudiados considerando la cantidad generada de los mismos.

Tabla 3.9. Energía anual teórica que se podría obtener por el proceso de combustión.

	<b>Poder calórico medido [MJ/kg]</b>	<b>Promedio anual de residuos [kg]</b>	<b>Energía aproximada aprovechada por año [MBtu]</b>
<b>Cascarilla de arroz</b>	14,56	266.653.000	3.679.869
<b>Bagazo de caña</b>	13,92	158.000.000	2.084.591

Para el proceso de digestión anaerobia utilizado para valorizar energéticamente a los residuos, se toma los datos presentados en la tabla 3.5, en la sección 3.3 en la que se da a conocer el volumen acumulado que arrojan los residuos estudiados al mes. Al realizar los cálculos para su transformación en energía se toma el poder calórico del metano como 35,65 kJ/L, se presentaron los valores de obtención energética mensual dados por cada residuo estudiado. Estos valores se observan en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Energía anual teórica que se podría obtener por el proceso de biodigestión.

	<b>Producción acumulada de metano [L/kg]</b>	<b>Energía teórica generada [kJ/kg]</b>	<b>Energía aproximada aprovechada [MBtu]</b>
<b>Cáscara de plátano</b>	1179,96	42.065	25.046.683
<b>Cascarilla de arroz</b>	139,88	4.986	1.260.152
<b>Bagazo de caña</b>	407,02	14.510	2.172.946

## 4. CONCLUSIONES

- Mediante la caracterización de los residuos se determinó su potencial para ser utilizados tanto en el proceso de combustión, como en el proceso de biodigestión.
- El trabajo presentado realiza una caracterización energética de los residuos agrícolas estudiados mediante el proceso de digestión anaerobia tipo Batch simple, es decir, se utilizó únicamente el inóculo (lodos anaerobios) con añadidura del sustrato, el cual sirve como indicador cuantitativo de la energía que se podría aprovechar de estos residuos.
- Para presentar indicadores energéticos cualitativos de los residuos estudiados es necesario estudiar diferentes técnicas que podrían utilizarse como, por ejemplo, la coodigestión o la añadidura de nutrientes, o estimulantes para los microorganismos metalogénicos como níquel, cobalto, entre otros.
- La importancia de este estudio como un indicador en la valorización energética de residuos agrícolas radica en que actualmente en Ecuador no se ha presentado indicadores de valorización energética específica para este tipo de biomasa, lo que brinda un punto de partida para incluir energías alternativas de este tipo en la matriz energética del país.
- Mediante procesos de combustión se caracterizó energéticamente a tres de los residuos agrícolas de más producción en Ecuador (cáscara de plátano, cascarilla de arroz y bagazo de caña) siendo superior para la cascarilla de arroz con 14,56 kJ/g, además se concluye que la cáscara de plátano no es un residuo idóneo para ser aprovechado energéticamente por este proceso por su alto contenido de humedad.
- Los valores obtenidos de la caracterización de la cascara de plátano hacen de este residuo idóneo para su aprovechamiento energético por medio del proceso de digestión anaerobia, pues dio el volumen de metano mas alto con un valor de 1179,96 [NmL/g SV], considerando un poder calórico de 35,65 J/mL para el metano, teóricamente de este residuo se puede obtener 42,07 kJ/g, lo que lo hace el residuo con mayor valor energético de los tres por este proceso.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Toledo, et al. "Estimación de la producción de residuos agrícolas en agro sistemas de caña de azúcar", *Cultivos Tropicales*, vol. 29, no. 3, pp. 17-21, 2008. [Online]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362008000300003&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362008000300003&lng=es&nrm=iso). Acceso: 10 jul 2019.
- [2] A. Chávez Porras y A. Rodríguez Gonzáles. "Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica", *Revista Academia y Virtualidad*, vol. 9, no. 2, pp. 6, 2016. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18359/ravi.2004>. Acceso: 10 jul 2019.
- [3] Banco Mundial, "Agricultura, valor agregado (% del PIB)", 2018. [Online]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?locations=EC>. Acceso: 10 jul 2019.
- [4] J. C. García, T. Machimura y T. Matsui, "Optimizing Plant Allocation for Bioethanol Production from Agro-residues Considering CO<sub>2</sub> Emission and Energy Demand-Supply Balance: A Case Study in Ecuador", *Waste and Biomass Valorization*, vol. 3, no. 4, pp. 435-442, 2012. [Online]. Disponible en: [10.1007/s12649-012-9138-2](https://doi.org/10.1007/s12649-012-9138-2). Acceso: 10 jul 2019.
- [5] H. Huaraca y C. Noriega, "Guía para facilitar el aprendizaje en el manejo integrado del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.)", *Guía de Aprendizaje*, no. 6. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Estación Experimental del Litoral Sur "Dr. Enrique Ampuero Pareja", Guayas-Ecuador, pp. 152, 2006. [Online]. Disponible en: <http://tecnologia.iniap.gob.ec/images/rubros/contenido/arroz/guiaf.pdf>. Acceso: 10 jun 2019.
- [6] Ingenio Azucarero San Carlos, "Proceso de Producción", 2016. [Online]. Disponible en: [http://www.sancarlos.com.ec/portal/html/themes/ingenio/pdf/proceso\\_produccion.pdf](http://www.sancarlos.com.ec/portal/html/themes/ingenio/pdf/proceso_produccion.pdf). Acceso: 10 jul 2019.
- [7] F. Martín-Mayoral, "Estado y mercado en la historia de Ecuador: Desde los años 50 hasta el gobierno de Rafael Correa," *Nueva Sociedad*, vol. 221, pp. 120-136,182, 2009. [Online]. Disponible en: <https://bvirtual.epn.edu.ec/docview/199575311?accountid=36685>. Acceso:10 jun 2109.
- [8] A. Simoes, "Ecuador", *The Observatory of Economic Complexity*. 2017. [Online]. Disponible en: <https://atlas.media.mit.edu/en/profile/country/ecu/>. Acceso: 10 jun 2019.

- [9] D. Salazar, W. Villafuerte, M. Cuichán, D. Orbe, J. Márquez, “Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2016”, *Dirección de Estadísticas Agropecuarias y Ambientales*, 2016. Disponible en: [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2016/Informe%20ejecutivo%20ESPAC\\_2016.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2016/Informe%20ejecutivo%20ESPAC_2016.pdf). Acceso 10 jun 2019.
- [10] Corporación Financiera Nacional, “Ficha Sectorial: Banano y Plátanos”, *GDGE-SUBG. de Análisis e Información*, agosto 2016. [Online]. Disponible en: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2017/09/Ficha-Sectorial-Banano.pdf>. Acceso: 10 jul 2019.
- [11] Corporación Financiera Nacional, “Ficha Sectorial: Azúcar”, *GDGE-SUBG. de Análisis e Información*, diciembre 2017. [Online]. Disponible en: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2018/01/Ficha-Sectorial-Azucar-y-Caña.pdf>. Acceso: 10 jul 2019.
- [12] Corporación Financiera Nacional, “Ficha Sectorial: Arroz”, *GDGE-SUBG. de Análisis e Información*, febrero 2018. [Online]. Disponible en: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2018/04/Ficha-Sectorial-Arroz.pdf>. Acceso: 10 jul 2019.
- [13] M. B. Ruilova Cueva y A. Hernández Monzón, “Evaluación de residuos agrícolas para la producción del hongo *Pleurotus ostreatus*”. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 48, no. 1, pp. 54-59, 2014. [Online]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223131337008>. Acceso: 10 jul 2019.
- [14] Ministerio del Ambiente, “Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos – PNGIDS ECUADOR”, enero 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>. Acceso: 10 jul 2019.
- [15] Ministerio del Ambiente, “Priorización para la Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) del Proyecto: Gestión Integral de Desechos Sólidos”, enero 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/PNGIDS1.pdf>. Acceso: 10 jul 2019.
- [16] B. Manterola, et al, “*Los residuos agrícolas y su uso en la alimentación de rumiantes*”. Santiago de Chile: 1999. Disponible en: <http://bibliotecadigital.fia.cl/handle/20.500.11944/1908>. Acceso: 10 jul 2019.
- [17] F. López, et al, “Aprovechamiento energético e integrado por fraccionamiento de biomasa lignocelulósica forestal y agroindustrial”. *Boletín Informativo CIDEU*, no. 5, pp. 7-19, 2008. [Online]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2718824.pdf>. Acceso: 12 jul 2019.

- [18] D. Mutz, et al, "Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos", Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Alemania, Informe Técnico, mayo 2017.
- [19] J. Escobar, et al, "Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos" en *Bioenergía*, Edición 1, Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, pp. 275-298.
- [20] X. Flotats y E. Campos, "Hacia una Gestión Integrada y Co-Tratamiento de Residuos Orgánicos", *RETEMA Revista Técnica de Medio Ambiente*, vol. 14, no. 81, pp. 41-53, 2001.
- [21] L. Borzacconi, I. López, A. Gazzola, C. Anido. "Estimación de la producción de biogás en un relleno sanitario", 2019.
- [22] G. López, "Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo", *Tecnura*, vol.13, no. 2, pp. 31-43, 2003. [Online]. Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/6187>. Acceso: 14 jul 2019.
- [23] K. Chuhgandro, G. Manitio, "Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas", Proyecto de Titulación, Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2010, [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1650>. Acceso: 14 jul 2019.
- [24] L. Cepero, et al., "Producción de biogás a partir de efluentes de biodigestores", *Pastos y Forrajes*, vol. 35, no. 2, pp. 219-226, 2012. [Online]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942012000200009&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200009&lng=es&nrm=iso). ISSN 0864-0394. Acceso: 14 jul 2019.
- [25] Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS– EP), "Planta de Generación de Energía Eléctrica a partir del Biogás", [Online]. Disponible en: <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zentools/zentools-slideshow/planta-de-incineracion-de-fauna-urbana-muerta-2>. Acceso:14 jul 2019.
- [26] *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, APHA, sección 2540 G.
- [27] A.Sadzawka, "Métodos de análisis de suelos", Santiago-Chile, Estación Experimental La Platina, 1990, pp. 130-135.

- [28] J. Lanza, P. Churion y N. Gómez, "Comparación entre el método Kjeldahl tradicional y el método Dumas automatizado (N Cube) para la determinación de proteínas en distintas clases de alimentos", *Saber*, vol.28, no.2, pp. 245-249, 2016. [Online]. Disponible en: <[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1315-01622016000200007&lng=es&nrm=iso](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622016000200007&lng=es&nrm=iso)>. Acceso: 19 jul 2109.
- [29] F. Raposo, M. De la Rubia, V. Fernández-Cegri y R. Borja, "Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 861-877, 2012. [Online]. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008). Acceso: 20 jul 2019.
- [30] S. Astals, D. Batstone, S. Tait y P. Jensen, "Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity", *Water Research*, vol. 81, pp. 208-215, 2015. [Online]. Disponible en: [doi: 10.1016/j.watres.2015.05.063](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.063). Acceso: 20 jul 2019.
- [31] I. Angelidaki, et al., "Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays", *Water Science & Technology*, vol. 59, no. 5, pp. 927-934, 2009. [Online]. Disponible en: [doi:10.2166/wst.2009.040](https://doi.org/10.2166/wst.2009.040). Acceso: 20 jul 2019.
- [32] C. Holliger, et al., "Towards a standardization of biomethane potential test", *Water Science and Technology*, vol. 74, no. 11, pp. 2515-2522, 2016. [Online]. Disponible en: [doi:10.2166/wst.2016.336](https://doi.org/10.2166/wst.2016.336). Acceso: 20 jul 2019.
- [33] *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, APHA, sección 2720 B.
- [34] H. Dormond, A. Rojas, C. Boschini, G. Mora, G. Sibaja, "Evaluación preliminar de la cascara de banano maduro como material de ensilaje, en combinación con pasto King Grass (*Pennisetum purpureum*). (Note Técnica)", *InterSedes Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica*, vol. 12, no. 23, 2011. [Online]. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/974>. Acceso: 20 jul 2019.
- [35] J. Hernandez, et al., "Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en harinas de clones de musáceas comestibles (*Musa spp.*)", *Revista Científica UDO Agrícola*, vol. 9, no 2, p. 449-457, 2009. [Online]. Disponible en: [sci-hub.se/10.0000/dialnet.unirioja.es/articulo/3308638](http://sci-hub.se/10.0000/dialnet.unirioja.es/articulo/3308638). Acceso: 20 jul 2019.

- [36] E. Morón, “La cáscara de plátano como adsorbente de metales pesados”, Steemit. <https://steemit.com/stem-espanol/@emiliomoron/la-cascara-de-platano-como-adsorbente-de-metales-pesados>. Acceso: 20 jul 2019.
- [37] A. Valverde, B. Sarria, J. Monteagudo, “Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz”, *Scientia et Technica*, no. 37, pp. 255-260, 2007. [Online]. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4055>. Acceso: 20 jul 2019
- [38] R. Díaz, “Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. Ecuador”, *CARBON*, vol. 24, no. 23.48, pp. 23-52, 2008. [Online]. Disponible en: <https://www.lippel.com.br/dados/download/16-07-2014-15-41caracterizacion-del-bagazo-de-cana-de-azucar.pdf>. Acceso: 20 jul 2019.
- [39] R. García, et al., “Uso de la cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado”, *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 27, no.1, pp. 31-39, 2011. [Online]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992011000100003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992011000100003&script=sci_arttext). Acceso: 20 jul 2019.
- [40] L. Tipanluisa, et al., “Estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo”, 2015. [Online]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/handle/123456789/23883>. Acceso: 20 jul 2019.
- [41] J. Guerrero y C. Ileana, “Evaluación del potencial de biometanización de la co-digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos”, Tesis de maestría, Grupo de investigación en gestión y modelación ambiental (GAIA), Universidad de Antioquia, Medellín, 2016. [Online]. Disponible en: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/7368>. Acceso: 20 jul 2019.
- [42] E. Fernandes, C. Marangoni, O. Souza, N. Sellin, “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy resource”, *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 603-608, 2013- [Online]. Disponible en: doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.008. Acceso: 20 jul 2019.
- [43] V. Sánchez, “Modelación matemática para un reactor de gasificación de lecho fluidizado que utiliza combustibles sólidos disponibles en Ecuador”, Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016.
- [44] A. Hussain y S. Dubey, “Specific methanogenic activity test for anaerobic treatment of phenolic wastewater”, *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 37-39, pp. 7015-

7025, 2013. [Online]. Disponible en: doi: 10.1080/19443994.2013.823116. Acceso: 201 jul 2019.

[45] M. Khan, et al., "Batch anaerobic digestion of banana waste-energy potential and modelling of methane production kinetics", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 18, no 1, pp. 110-128, 2016. [Online]. Disponible en: <http://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/3244>. Acceso: 20 jul 2019.

[46] L. Contreras, H. Schelle, C. Sebrango y I. Pereda, "Methane potential and biodegradability of rice straw, rice husk and rice residues from the drying process" *Water Science and Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 1142–1149, [Online]. Disponible en: doi: 10.2166/wst.2012.951. Acceso: 20 jul 2019.

[47] O. Joseph, M. Rouez, H. Métivier-Pignon, R. Bayard, E. Emmanuel y R. Gourdon. "Adsorption of heavy metals on to sugar cane bagasse: Improvement of adsorption capacities due to anaerobic degradation of the biosorbent". *Environmental Technology*, vol. 30, no. 13, pp. 1371–1379, 2009. [Online]. Disponible en: doi: 10.1080/09593330903139520. Acceso: 20 jul 2019.

[48] Y. Acosta, L. Abreu, Ma. Obaya, "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I", *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 39, no. 1, pp. 35-48, 2005. [Online]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>. Acceso: 20 jul 2019.

[49] M. Carvajal, F. Murgueitio, "Caracterización de las proteínas de la cascara de plátano tipo Williams (Giant Cavendish)", Proyecto de titulación, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2017.

[50] G. Herrera, A. Anaguano, D. Suarez. "Caracterización estructural de la cascarilla de arroz modificada como adsorbente alternativo y eficiente para la remoción de Cr (VI) en solución", *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, vol. 4, no 1, pp. 22-29, 2015. [Online]. Disponible en: <http://hemeroteca.unad.edu.co/entrenamiento/index.php/riaa/article/view/976>. Acceso: 21 jul 2019.

[51] J. Vargas, et al., "Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos", *Revista Científica*, no 25, 2014. [Online]. Disponible en: [http://revistaiiqb.usac.edu.gt/index.php/revista\\_cientifica/article/viewFile/361/pdf\\_350](http://revistaiiqb.usac.edu.gt/index.php/revista_cientifica/article/viewFile/361/pdf_350). Acceso: 21 juli 2019.

- [52] K. Moreira, "Reutilización de residuos de la cascara de bananos (*Musa Paradisiaca*) y plátanos (*Musa Sapientum*) para la producción de alimentos destinados al consumo humano", Proyecto de titulación, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2013.
- [53] J. Aguilar, T. Alvarez, E. Alejandro, "Estudio del potencial energético de la cascara de arroz ecuatoriano peletizado para su uso como combustible. 2018. Proyecto de titulación, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [54] Centro de Investigación de la caña de azúcar del Ecuador, *Informe Anual 2016*. [Online]. Disponible en: <https://cincae.org/wp-content/uploads/2013/04/Informe-Anual-2016.pdf>. Acceso 21 jul 2019.
- [55] R. Calderón, et al., "Vivienda net-zero en Mexicali, BC, un camino hacia las políticas energéticas en desarrollos habitacionales sustentables", En *6to. Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual*, Mexicali, 5, 6 y 7 octubre 2010. Centre de Política de Sòl i Valoracions, 2010. [Online]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/12828>. Acceso: 21 jul 2019.
- [56] A. Chávez, A. Rodríguez, "Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica". *Revista Academia y Virtualidad*. Vol. 9, no. 2, pp. 90-107, 2016. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18359/ravi.2004>. Acceso: 21 jul 2019.
- [57] Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 76, pp. 1485–1496, 2017. [Online]. Disponible en: [doi:10.1016/j.rser.2016.11.184](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184)