

Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos  
agroindustriales de la caña de azúcar

Oliver Otero Guerrero

**UNIVERSIDAD ICESI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES**  
**PROGRAMA DE QUÍMICA**  
**Cali**  
**2017**

Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos  
agroindustriales de la caña de azúcar

Oliver Otero Guerrero

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE PREGRADO EN  
QUÍMICA

MARÍA FRANCISCA VILLEGAS TORRES, PHD.

Cali

2017



Aprobado Por:



Andrés Felipe Davalos Vélez  
Evaluador

*M. Francisca Villegas*  
María Francisca Villegas Torres  
Tutor del Proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por darme salud, paciencia y sabiduría. A mis padres, que me han apoyado de distintas maneras a lo largo de mi vida y han estado para mí en los momentos difíciles, es por esto que todos mis triunfos son para ellos. A la Universidad Icesi, que me abrió las puertas y me dio la oportunidad de realizar mis estudios en el mejor ambiente posible, donde pude conocer grandes maestros y compañeros. A mis profesores, que tanto aprecio les tengo y que aportaron de su conocimiento para formarme como profesional. A mi tutora María Francisca Villegas, por ayudarme a crecer como persona y como profesional integro, por permitir desarrollarme en el grupo de investigación, por cada una de las enseñanzas aportadas como tutor, por su tiempo y su paciencia brindada para poder culminar el proyecto. A los integrantes de mi grupo de investigación, por su colaboración con las múltiples tareas y problemas que se presentaron, por su voluntad, conocimiento y tiempo dedicado en el desarrollo del proyecto. A las personas que pasaron por esta etapa de mi vida, que, aunque unas más que otras, dejaron algo en mí. Quiero hacer un agradecimiento especial a mis amigos, que siempre estuvieron apoyándome en los momentos más difíciles y que compartieron muchas experiencias tanto académicas como personales conmigo, sin ellos, me hubiese vuelto loco. Por último, quiero agradecerles a todas las personas que creyeron en mí, pues a pesar de las falencias y las caídas, siempre me alentaban para sacar adelante la carrera. Y a los que no creyeron en mí y que dijeron que no podría, porque fue una gran motivación querer demostrarles lo contrario.

## CONTENIDO

RESUMEN DEL PROYECTO .....	9
ABSTRACT .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	12
2.1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN .....	12
2.2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	14
2.2.1 Aspectos generales de la digestión anaerobia .....	14
2.2.2 Requerimientos para un diseño industrial de una planta de biogás. ....	19
2.2.3 Conceptos básicos de BMP. ....	19
2.2.4. Características requeridas para inóculos. ....	20
2.3 OBJETIVOS .....	21
2.3.1 Objetivo general .....	21
2.3.2 Objetivos específicos .....	21
2.4 METODOLOGÍA PROPUESTA .....	22
2.4.1 Caracterización de los sustratos.....	22
2.4.2 Determinación de producción de biogás .....	22
2.4.3 Cuantificación de metano en biogás .....	23
2.4.4 Análisis estadístico.....	24
2.4.5 Matriz de marco lógico .....	25
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
2.5.1 Caracterización de sustratos .....	27
2.5.2 Cuantificación de la producción de biogás de los sustratos y combinaciones. ...	29
2.5.3 Identificación de los sustratos y combinaciones que tengan una mejor producción de biogás con metano.....	44
2.5.4 Cuantificación de la cantidad de metano en el biogás producido de los sustratos evaluados. ....	46
2.6 CONCLUSIONES.....	47
2.7 RECOMENDACIONES.....	49
3.1 REFERENCIAS .....	50

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Características generales del biogás (Deublein & Steinhauser, 2008) .....	17
<b>Tabla 2.</b> Matriz de marco lógico. ....	25
<b>Tabla 3.</b> Porcentaje de humedad y solidos volátiles de los diferentes sustratos .....	27
<b>Tabla 4.</b> Promedio de pH para las muestras empleadas en la digestión anaerobia.....	28
<b>Tabla 5.</b> Relación C/N de los sustratos evaluados.....	28
<b>Tabla 6.</b> Rendimiento de biogás de las vinazas luego de 15 días de digestión. ....	44
<b>Tabla 7.</b> Rendimiento de biogás de los residuos agroindustriales. ....	45
<b>Tabla 8.</b> Rendimiento de biogás de las combinaciones de vinaza D y residuos agroindustriales. ....	45

## Lista de gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Rendimiento de biogás de diferentes inóculos usando celulosa como sustrato..	29
<b>Gráfica 2.</b> Rendimiento de biogás vinazas provenientes de diferentes ingenios en el Valle del Río Cauca.	32
<b>Gráfica 3.</b> Rendimiento de biogás de la vinaza A (A) y vinaza B (B) pre- y pos- evaporación	34
<b>Gráfica 4.</b> Rendimiento de biogás residuos agroindustriales provenientes de la industria azucarera en el Valle del Río Cauca.	36
<b>Gráfica 5.</b> Rendimiento de biogás de vinaza D codigerida con varios sustratos).	38
<b>Gráfica 6.</b> Rendimiento de biogás del RAC y de su mezcla con vinaza D.	40
<b>Gráfica 7.</b> Rendimiento de biogás de miel y su combinación con vinaza D	41
<b>Gráfica 8.</b> Rendimiento de biogás del bagacillo y de su mezcla con vinaza D.	43

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Etapas principales de la digestión anaerobia (Diaz et al., 2002).....	16
<b>Figura 2.</b> Equipo BIOGAS 5000. ....	24
<b>Figura 3.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de los inóculos con celulosa y sus respectivos blancos.....	31
<b>Figura 4.</b> Conclusiones de la prueba no para métrica de Kruskal-Walis para el BMP de los inóculos con celulosa y sus respectivos blancos.....	31
<b>Figura 5.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de las vinazas .....	33
<b>Figura 6.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de las vinazas .....	33
<b>Figura 7.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de las vinazas A Pre y Pos.....	35
<b>Figura 8.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de las vinazas B Pre y Pos.....	35
<b>Figura 9.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de los residuos agroindustriales. ....	37
<b>Figura 10.</b> Conclusiones de la prueba no para métrica de Kruskal-Walis para el BMP de los residuos agroindustriales. ....	37
<b>Figura 11.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de las diferentes mezclas entre los residuos agroindustriales y la vinaza D. ....	39
<b>Figura 12.</b> Conclusiones de la prueba no para métrica de Kruskal-Walis para el BMP de las diferentes mezclas entre los residuos agroindustriales y la vinaza D .....	39
<b>Figura 13.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP del RAC y su mezcla con vinaza D.....	41
<b>Figura 14.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP de la miel y su mezcla con vinaza D.....	42
<b>Figura 15.</b> Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Walis para el BMP del bagacillo y su mezcla con vinaza D .....	44



## RESUMEN DEL PROYECTO

Dentro de la región del Valle Del Cauca los ingenios representan una gran parte de la industria, generando ingresos provenientes de la producción de azúcar y bioetanol a partir de la caña de azúcar y sus derivados. Estos procesos industriales dejan grandes cantidades de residuos que se producen desde la cosecha de la caña hasta la etapa final de obtención del producto. Dentro de estos residuos se destaca la vinaza obtenida luego de la destilación del etanol. Debido a su composición química esta puede ser utilizada en procesos de digestión anaerobia para la obtención de metano como fuente de energía renovable. El objetivo de este estudio fue determinar el potencial de producción de biogás de diferentes desechos agroindustriales de la caña de azúcar (bagacillo, miel, residuo agrícola de cosecha y vinaza), tanto individual como de sus combinaciones, para que a futuro puedan ser implementadas como sustrato para la producción de energía renovable en la región. Se evaluó el potencial de biogás de 6 muestras provenientes de 4 Ingenios azucareros diferentes, donde las vinazas B y C obtuvieron el mayor rendimiento. De las vinazas A y B se tomaron muestras pre- y pos-evaporación (Pre y Pos). Los resultados indican que existen diferencias significativas para el rendimiento de las vinazas B pre y pos-evaporación al igual que para las vinazas A. De aquí se propone que el proceso de evaporación puede afectar el rendimiento de biogás dependiendo de la composición de las vinazas. Se llevó a cabo la codigestión de una de las vinazas con cosustratos de alto contenido de carbono provenientes del procesamiento de la caña de azúcar. La mezcla vinaza/miel generó un incremento en la producción de biogás respecto al de la vinaza, mientras que las mezclas con RAC y bagacillo no presentaron diferencias estadísticamente significativas respecto a la vinaza. De las pruebas realizadas se concluyó que en general, las vinazas poseen el mayor potencial de biogás entre los sustratos evaluados.

## ABSTRACT

Within the Valle del Cauca region, the mills represent a large part of the industry, generating revenues from the production of sugar and bioethanol from sugar cane and its derivatives. These industrial processes leave large amounts of waste produced from the harvest of the cane until the final stage of obtaining the product. Within these residues the vinasse obtained after the distillation of the ethanol is emphasized. Due to its chemical composition, vinasse can be used in anaerobic digestion processes to obtain methane as a source of renewable energy. The objective of this study was to determine the biogas production potential of different agroindustrial wastes from sugarcane (bagacillo, honey, crop residue and vinasse), both individual and from their combinations so that in the future they can be implemented as a substrate to produce renewable energy in the region. The biogas potential of 6 samples from 4 different sugar mills was evaluated, where vinasse B and C obtained the highest yield. Pre- and post-evaporation samples (Pre and Pos) were taken from vinasse A and B. The results indicate that there are no significant differences for the yield of pre and post-evaporation vinasse B, as same for vinasse A. From here it is proposed that the evaporation process can affect the biogas yield depending on the composition of the vinasse. Co-digestion of one of the vinasse was carried out with high-carbon cosubstrates from the processing of sugar cane. The vinasse / honey mixture generated an approximate 48% increase in biogas production compared to that of the vinasse, while the mixtures with RAC and bagacillo presented no statistically significant differences. From the tests carried out, it was concluded that, in general, the vinasse has the highest biogas potential among the evaluated substrates.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de residuos industriales producidos a nivel mundial se ha calculado en aproximadamente  $3.045 \times 10^6$  toneladas anuales, lo que representa una gran cantidad de desechos que se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica, que los convierte en una fuente de contaminación al momento de disponerlos (Janke, Leite, Nikolausz, Schmidt, & Liebetrau, 2015a). Mediante la digestión anaerobia se puede dar un tratamiento adecuado antes de desechar dichos residuos y a su vez valorizar este material.

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y/o vegetales) son convertidos en biogás, el cual es una mezcla, en su mayoría, de metano y dióxido de carbono (Janke, Leite, Nikolausz, Schmidt, & Liebetrau, 2015b). Este proceso es llevado a cabo por un consorcio de microorganismos que interactúan entre ellos cumpliendo funciones diferentes, vitales para la producción de metano.

La degradación anaerobia de materiales orgánicos como los residuos agroindustriales ha sido presentada como una tecnología adecuada para el tratamiento de estos residuos y la producción de energía a partir de la generación de biogás. De esta manera se puede concluir que la digestión anaerobia permite alcanzar dos objetivos fundamentales a la vez, el manejo adecuado de los residuos y la producción de energía renovable como una fuente de ingresos adicional, ambos contribuyendo a la preservación del medio ambiente.

El proyecto busca encontrar el potencial de producción de biogás para diferentes residuos agrícolas provenientes de la industria azucarera como el bagacillo, la cachaza, el RAC (Residuo Agrícola de Cosecha) y la vinaza, con el fin de reportar su capacidad de producir gas para su uso como energía alternativa en diferentes sectores del país, en especial, en el sector rural donde se presenta la necesidad de un suministro energético.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 2.1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

Dentro de la región del Valle Del Cauca los ingenios representan una gran parte de la industria, generando ingresos provenientes de la producción de azúcar y bioetanol a partir de la caña de azúcar y sus derivados. Estos procesos industriales dejan grandes cantidades de residuos que se producen desde la cosecha de la caña hasta la vinaza que se obtiene como subproducto de la fermentación de bioetanol (Cerón, 2013).

Residuos como la vinaza, que poseen altas cargas de contaminantes debido al proceso de fermentación al cual se somete, deben ser tratados antes de ser desechados, pues su disposición directa genera un riesgo ecológico. Es por esto que a nivel mundial se le ha buscado diferentes usos, con el fin de reaprovechar sus propiedades. Una de las potenciales aplicaciones de este subproducto es la producción de bioenergía en forma de metano a partir de la digestión anaerobia, de aquí nace el interés por esta área, ya que se le da un valor agregado a un residuo industrial, lo que puede significar una fuente de ingreso importante para la industria, y a la vez, se le da un tratamiento que reduce notablemente la carga de contaminantes (Mariscal & Camargo, 2015).

El metano no solo se obtiene de la vinaza, también se puede obtener a partir de otros residuos agroindustriales de la caña de azúcar como el bagazo, la cachaza y los residuos de cosecha (Robles-gonzález & Villalobos-castillejos, 2008). Debido al gran volumen de éstos desechos agrícolas, que se generan diariamente en las diversas operaciones relacionadas con la producción de azúcar en la región y las actividades económicas de origen agroindustrial, se plantea que es posible realizar la digestión anaeróbica de estos residuos biodegradables, para obtener una producción considerable de mezcla gaseosa combustible con contenido de metano superior al 50% en volumen (Cendales, 2011). Por ende, en un proceso de producción de Biogás se pueden utilizar residuos orgánicos para producir energía a gran escala mediante la acción de microorganismos en ausencia de aire. El producto resultante está formado por metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases en menor proporción que los anteriores, lo cual depende de la composición química y algunos parámetros fisicoquímicos del sustrato, como la relación C:N, porcentaje de sólidos volátiles, humedad, pH, etc. (Cobos & Sierra, 2007).

Esta área de investigación es importante debido al aumento del consumo energético tanto en Colombia como en el mundo, y es necesario hallar fuentes de energía renovables más limpias para que en un futuro cercano reflejen un menor impacto ambiental. Por tal motivo surge el interés por obtener energía limpia a partir de fuentes alternativas como puede ser la biomasa residual. El potencial energético de éstos residuos brinda expectativas de uso industrial como fuente

complementaria de energía para distintos procesos, es por esto que se debe determinar el potencial de producción de biogás de cada tipo de residuo y sus características fisicoquímicas, para determinar que tipo de diseño de biodigestión se debe llevar a cabo para obtener la mayor cantidad de producto a partir de cada sustrato, antes de considerarlo como un desecho (Holliger et al., 2016) (Tiwari, Singh, & Thakur, 1992).

El proyecto busca encontrar y reportar el potencial de producción de biogás de diferentes residuos agrícolas provenientes de la industria azucarera, para que en un futuro se pueda implementar el biogás como energía alternativa en diferentes sectores del país. La finalidad es obtener el mayor rendimiento posible de estos productos, antes de ser considerados residuales, para que sean valorados como materia prima para la producción de energía sostenible utilizando la gran masa de residuos anteriormente mencionada.

## **2.2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

### **2.2.1 Aspectos generales de la digestión anaerobia**

De acuerdo a lo expresado por Varnero (2011), la digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de microorganismos que son sensibles o completamente inhibidos por el oxígeno o sus precursores (Garcés, Reyes, & Gutierrez, 2014).

La digestión anaerobia es un proceso natural en el que una comunidad de microorganismos coopera para formar una fermentación estable y autorregulada que convierte materia orgánica residual en una mezcla de gases, donde el metano y dióxido de carbono presentan una mayor proporción (Mussati et al., 1999). Los residuos a tratar (sustrato) serán los aportantes del carbono y de la energía de los procesos biológicos. En forma general, sin importar las características del sustrato, toda la degradación anaerobia se presentará bajo las mismas etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Cobos & Sierra, 2007).

Este proceso biológico se realiza en biodigestores, donde interacciona el sustrato y el inóculo. Éste último es la biomasa que aporta el consorcio microbiano encargado de llevar a cabo las diferentes etapas de la degradación. El inóculo es muy importante en el proceso de digestión, pues dependiendo de que microorganismos y que tan activos estén, se podrá producir una mayor cantidad de biogás con una mayor proporción de metano (Esposito, Frunzo, Liotta, Panico, & Pirozzi, 2012).

Los biodigestores, conocidos también como biorreactores, son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica o el agua residual permanecen un periodo de tiempo para lograr su descomposición, produciendo biogás y bioabono (Yank et al., sf; Pedraza et al. 2002; Ramón et al. 2006).

Para llevar a cabo la digestión anaerobia de residuos orgánicos se utilizan generalmente dos tipos de procesos: los continuos y los discontinuos. En los sistemas discontinuos o en batch, los reactores se llenan una vez con sustrato e inóculo y se cierran durante el tiempo de retención para finalmente abrirse y retirar el efluente del reactor (Batista, 1998). En los sistemas continuos, en cambio, el sustrato se introduce continuamente en el reactor, saliendo de este la misma cantidad introducida (Díaz, 2013).

Los reactores discontinuos son útiles porque pueden llevar a cabo una rápida digestión con un equipo barato y simple, y también porque en ellos se puede evaluar la velocidad de digestión fácilmente (Weiland, 2006 en Khalid et al. 2011). En los sistemas de una etapa, todos los procesos biológicos se llevan a cabo

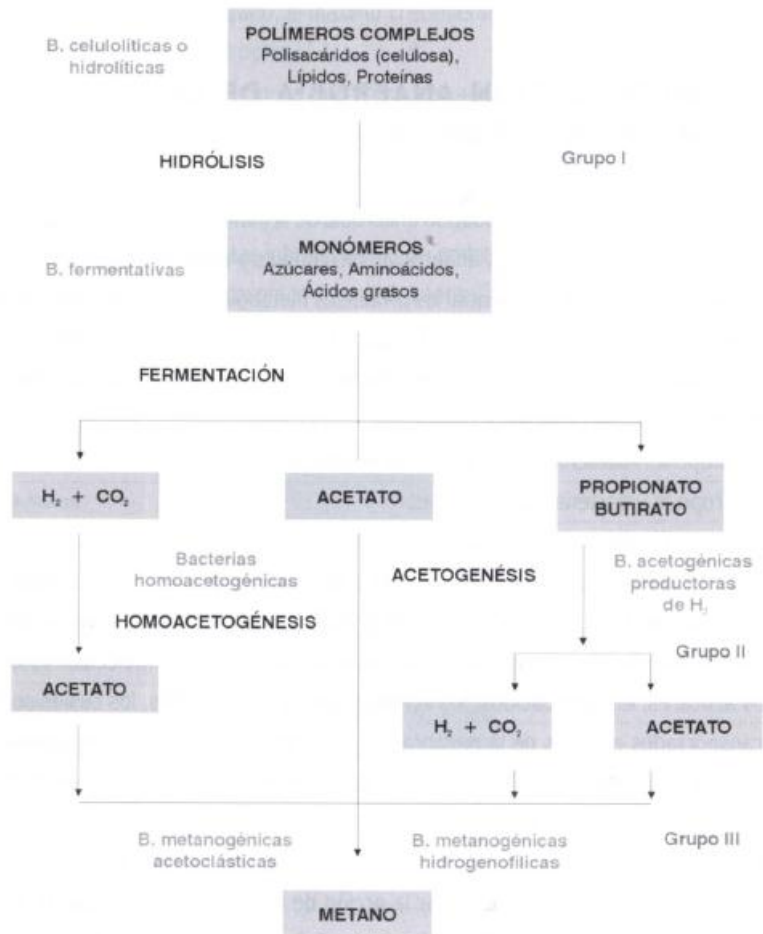
simultáneamente en un único reactor. Por el contrario, los sistemas de dos o más etapas permiten que los procesos biológicos se lleven a cabo secuencialmente en al menos dos reactores y permite un flujo entre la biomasa sin que sea removida del lugar de la digestión, lo que ahorra tiempo y gastos, y a su vez, reduce la pérdida de biogás (Díaz ,2013).

Para determinar qué tipo de proceso o diseño se debe realizar, es necesario tener en cuenta distintos factores que influyen en el proceso de producción de biogás. Uno de estos aspectos es el tipo de sustrato a ser digerido, ya que dependiendo de su composición en general, puede tardar más o menos tiempo en ser metabolizado (Doelsch, Masion, Cazevieuille, & Condom, 2009) (Mijangos-cortes et al., 2011). En el caso de sustratos con altas cantidades de lípidos, que en general poseen cadenas largas de carbono, difíciles de degradar, llevará más tiempo digerir muestras de este tipo, pues le tomará más tiempo a la comunidad microbiana metabolizar la muestra (Leal, Chirinos, Leal, . Morán, & Barrera, 2003). Por el contrario, para sustratos con mayor cantidad de azúcares, se logrará llegar al potencial máximo en menos tiempo gracias a la velocidad en que se metabolizan este tipo de moléculas (Aristizábal, 2015).

Como se mencionó anteriormente, éste proceso se lleva a cabo por medio de diferentes etapas, cada etapa es realizada por comunidades de bacterias con capacidades diferentes. Las bacterias hidrolíticas se encargan de hidrolizar polímeros como azúcares, lípidos y proteínas, para que otras bacterias puedan alimentarse de compuestos más sencillos (Giordano, 2012). Las fermentativas se encargan de transformar los monómeros de carbono principalmente en acetato, propionato, butirato y CO<sub>2</sub> para que las bacterias acetogénicas puedan transformar lo que no se convirtió en acetato, ya que éste es el alimento principal de los microorganismos metanogénicos, los cuales son los encargados de producir el metano a partir de acetato y CO<sub>2</sub>. La figura 1 presenta las diferentes etapas descritas anteriormente.

La calidad del gas no sólo depende del inóculo, sino también de la composición del sustrato a degradar y de las condiciones a las cuales se lleve el proceso (Fernández, 2005). Dependiendo de la cantidad de compuestos carbonados que estén disponibles como alimento para los microorganismos se puede incrementar el rendimiento de la digestión, sin embargo, se debe controlar la cantidad de estos azúcares, pues una concentración demasiado alta puede inhibir el proceso (Seiffert, Kaltschmitt, & Miranda, 2009).

Existen otros compuestos que pueden inhibir el proceso, como alto contenido de metales o compuestos fenólicos, por lo que se puede presentar una gran diferencia entre la composición del biogás producido por dos sustratos distintos . En la tabla 1 se presentan algunas características del biogás y su rango de composición de metano (Zumalacárregui, Pérez, Lombardi, Rodríguez, & Zumalacárregui, 2008).



**Figura 1.** Etapas principales de la digestión anaerobia (Diaz et al., 2002).



**Tabla 1.** Características generales del biogás (Deublein & Steinhauser, 2008)

<b>Composición</b>	55-70% metano (CH <sub>4</sub> ) 30-45% dióxido de carbono CO <sub>2</sub> Trazas de otros gases
<b>Masa molar</b>	16.043 Kg Kmol <sup>-1</sup>
<b>Olor</b>	El olor del biogás desulfurado es imperceptible
<b>Densidad</b>	1.2 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Temperatura crítica</b>	-82.5 °C
<b>Presión crítica</b>	75-89 Bar
<b>Contenido energético</b>	6.0 – 6.5 kW h m <sup>-3</sup>
<b>Temperatura de ignición</b>	650-750 °C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)
<b>Límite de exposición</b>	6-12% de biogás en el aire
<b>Equivalente de combustible</b>	0.60 – 0.65 L petróleo /m <sup>3</sup> biogás

La producción de biogás mediante la digestión anaerobia de residuos agroindustriales ha comenzado su desarrollo en Colombia siguiendo los pasos de otros países europeos como Dinamarca, Alemania, Suecia o Austria, con el objetivo de apostarle a los ganaderos, industriales, entidades municipales y asociaciones que quieran aprovechar los desechos de animales, los subproductos de su industria, o los residuos de su municipio para generar energía renovable y contribuir a la conservación del medio ambiente (Martinelli & Filoso, 2008)(Fontes, Rubio, & Pizzio, 2004) .

La digestión anaerobia a partir de diferente materia prima es una práctica que tiene el país hace más de 30 años. Inició con la instalación masiva de biodigestores para procesar residuos orgánicos, animales y vegetales con el fin de producir la energía necesaria para atender las necesidades básicas del sector rural como cocción de alimentos e iluminación (Fundación Pesenca, 1992; IIT, 1983).

Esta tecnología ha cambiado a través de los años debido a la implementación de mejores materiales en el desarrollo de biodigestores y la optimización de los procesos, considerando que esta iniciativa en el país ha llamado la atención de muchos debido a la capacidad de procesar diferentes tipos de residuos orgánicos utilizando biodigestores para producir metano (Garcés et al., 2014).

En Colombia la digestión anaerobia se ha direccionado al tratamiento de las aguas residuales, muestra de ello son los 80 reactores que tratan alrededor de 855L/s. Estas instalaciones se emplean en el tratamiento de efluentes de procesos industriales, agroindustriales y actividades domésticas (Diaz et al., 2002).

Este proceso de residuos agroindustriales tiene gran importancia en la actualidad debido al crecimiento económico a causa de la globalización. El total de la producción mundial de los residuos agroindustriales es de aproximadamente de  $3045 \times 10^6$  toneladas/ año, el mayor productor es el continente asiático con  $1367 \times 10^6$  toneladas/ año lo que representa el 44.9% de la producción total, seguido por Europa, Norteamérica, Latinoamérica y África siendo los dos últimos los menores generadores de estos residuos con un 9.1% y un 5.3% respectivamente (Fontes, Rubio, & Pizzio, 2004). Con base en lo anterior, el potencial energético total de los residuos industriales y agrícolas son de alrededor de  $13211 \times 10^{15}$  J, siendo los principales continentes generadores Norteamérica y Asia con  $3675 \times 10^{15}$  J y  $3343 \times 10^{15}$  J respectivamente (Fontes, Rubio, & Pizzio, 2004).

En materia de biogás, el país aún no ha incursionado en la producción industrial del mismo, a pesar de que éste presenta una nueva oportunidad de negocio para la obtención de energía eléctrica y calor a partir de la biomasa, y también como una solución al problema de los desperdicios orgánicos de establecimientos ganaderos, granjas avícolas, industrias alimenticias y desperdicios orgánicos de las ciudades. (Garcés et al., 2014)

A nivel mundial se han reportado potenciales de biogás de diferentes muestras orgánicas provenientes de diferentes fuentes, desde desecho animal hasta residuos industriales de todo tipo (Meunchang, Panichsakpatana, & Weaver, 2005). Los estudios de este tipo en Colombia han reportado potenciales de producción de biogás principalmente para la vinaza, desechos orgánicos municipales y desechos de poda, sin embargo, pocos de estos estudios se han llevado a cabo con equipos modernos, los cuales se están usando como estándares a nivel mundial, es por esto que este estudio difiere de los otros, no solo en el método sino en el tipo de sustratos, pues se van a emplear 4 sustratos provenientes de la industria azucarera (bagacillo, cachaza, RAC y vinaza), específicamente de la región del Valle del Cauca. Posteriormente se evaluará el efecto de usar combinaciones de estos sustratos en la producción de biogás para determinar si la codigestión de residuos potencia la producción o si presentan efectos inhibitorios (El-mashad & Zhang, 2010).

En Colombia existen áreas que presentan déficits energéticos a pesar de que poseen abundantes recursos naturales (biomasa vegetal, desperdicios de sistemas ganaderos, residuos agroindustriales, etc.). Esta situación genera nuevas alternativas para dar un valor agregado a los desechos industriales, produciendo esa energía faltante a partir de biomasa, incrementando la rentabilidad de los establecimientos que aprovechen esta situación y ofreciendo autonomía energética a sus pueblos (Garcés et al., 2014).

La digestión anaerobia de materiales orgánicos como los residuos agroindustriales ha sido presentada como una tecnología adecuada para el tratamiento de estos residuos y la producción de energía a partir de la generación de biogás como se mencionó anteriormente (Fernández et al., 2005, Ohandja et al., 2010, Khalid et al., 2011). El metano se emplea en turbinas de gas y en generadores de vapor (calderas) con el fin de generar energía, la cual puede ser utilizada dentro de la zona industrial o puede ser empleada para abastecer lugares con necesidades energéticas pequeñas. De esta manera se puede concluir que la digestión anaerobia permite alcanzar dos objetivos fundamentales a la vez, el manejo adecuado de los residuos y la producción de energía renovable (Guendouz et al., 2010).

### **2.2.2 Requerimientos para un diseño industrial de una planta de biogás.**

Los requerimientos para realizar el diseño de una planta de producción de biogás deben tener en cuenta el grado de aplicación y la finalidad de la tecnología. Primero se debe establecer la región y el lugar donde se va a construir la planta. Se debe conocer sobre el material que se va a trabajar, y dependiendo de las necesidades de producción se podrá seleccionar el sistema de digestión más adecuado para el proceso y así tener una idea clara del tamaño y forma del digestor (Tiwari et al., 1992).

Se deben tener en cuenta factores como el rendimiento de biogás y su concentración de metano, así como el rendimiento de desecho orgánico y el tiempo de retención óptimo. A partir de estos datos se puede determinar el volumen del digestor para que tenga la capacidad necesaria que requiera el sustrato y su producto (Angelis-dimakis et al., 2011). Conociendo el tipo de residuos orgánicos que se producen durante la digestión se puede elegir el material del cual estará hecho el digestor con el fin de ser resistente a daños por corrosión u otros factores. Existen otros factores como propiedades del suelo y del terreno, así como la capacitación del recurso humano, que también se deben tener en cuenta para el diseño industrial (Tiwari et al., 1992).

### **2.2.3 Conceptos básicos de BMP.**

El BMP o Biomethane Potential es un parámetro que determina el diseño de una planta de biogás ya que mide la producción total de metano a partir de diferentes materiales orgánicos, tanto líquidos como sólidos. Es un procedimiento donde se lleva a cabo la digestión anaerobia de un determinado sustrato, pero controlando factores de interés como la cantidad de sólidos volátiles (VS) de la muestra, la relación VS de inóculo frente al sustrato y las condiciones experimentales en general, como temperatura y agitación (Holliger et al., 2016)

Es una digestión anaerobia en batch y no tiene un límite de tiempo exacto ya que el proceso termina sólo cuando se detiene la producción de biogás (Samer, n.d.). El gas producido durante la digestión debe ser medido en todo momento con el fin de cuantificar el volumen producido a partir de determinados gramos de muestra,

así mismo, este gas debe ser recolectado para evaluar la concentración de metano del gas producido. La digestión de la muestra debe hacerse como mínimo por triplicado con el fin de tener resultados estadísticamente significativos (Holliger et al., 2016).

#### **2.2.4. Características requeridas para inóculos.**

Para llevar a cabo el test BMP de manera adecuada es necesario que el inóculo a usar cumpla con ciertas características establecidas previamente. El inóculo debe ser fresco y debe provenir de un reactor anaerobio activo, así como debe tener una variedad microbiana para que ningún sustrato presente problemas a la hora de ser digerido. El inóculo debe ser degasificado antes de llevar a cabo la digestión con el fin de retirar cualquier tipo de gas residual que pueda alterar la medición del BMP. Su actividad debe ser comprobada empleando acetato o celulosa como sustrato para verificar que esté llevando a cabo una actividad metanogénica (Holliger et al., 2016). Según lo anterior, con miras a implementar la digestión anaerobia para tratar los residuos agroindustriales de la caña de azúcar disponibles en la región del valle del río Cauca, se debe evaluar este parámetro.

## **2.3 OBJETIVOS**

### **2.3.1 Objetivo general**

Determinar el potencial de producción de biogás de diferentes desechos agroindustriales de la caña de azúcar (bagacillo, cachaza, residuo agrícola de cosecha y vinaza) tanto individual como de sus combinaciones.

### **2.3.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar los sustratos teniendo en cuenta parámetros como la relación C:N, pH, humedad, y sólidos volátiles.
- Cuantificar la producción de biogás de cada uno de los sustratos y combinaciones.
- Cuantificar la cantidad de metano en el biogás producido de los sustratos evaluados.
- Identificar los sustratos y combinaciones que tengan una mejor producción de biogás con metano.

## **2.4 METODOLOGÍA PROPUESTA**

### **2.4.1 Caracterización de los sustratos**

Para el análisis de humedad se determinó el porcentaje de agua dentro de cada muestra exponiendo cada sustrato a una temperatura de 105 °C por 24 horas, pesando la muestra antes y después del procedimiento. Los sólidos volátiles se determinaron secando las muestras a 105 °C por 24 horas y luego llevándolas a una mufla a 500 °C por otras 24 horas, de esta manera los compuestos volátiles se calcularon por diferencia de peso. Para la determinación del pH se realizó una suspensión en agua de cada sustrato a la cual se le determinó el pH por medio de un potenciómetro. Las pruebas mencionadas anteriormente se realizaron por triplicado. La determinación de la relación C:N se realizó mediante la combustión total de cada muestra a una temperatura aproximada de 1000°C, donde se producen compuestos como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub> los cuales son separados y medidos por un detector de conductividad térmica que cuantifica cada compuesto.

### **2.4.2 Determinación de producción de biogás**

A cada sustrato se le debe calcular el porcentaje de sólidos volátiles con el fin de determinar la cantidad de materia orgánica que aportará a la digestión anaerobia (Mijangos-cortes et al., 2011). La medición de sólidos volátiles se llevó a cabo como se explicó en la sección **2.4.1**.

Una vez que el porcentaje de sólidos volátiles de los sustratos y del inóculo se determinó, se procedió a hacer el cálculo para estimar cuanto sustrato se debe adicionar respecto al inóculo con el fin de tener una relación 1:6 de sólidos volátiles de sustrato respecto a los sólidos volátiles de inóculo en el reactor. La cantidad pesada de cada inóculo y sustrato debe ser reportada con exactitud ya que a partir de estos valores se calcula el rendimiento de la digestión para cada gramo de sustrato.

El siguiente paso fue montar cada reactor según el montaje preestablecido y con la cantidad de sustrato e inóculo establecido según el cálculo de los sólidos volátiles. Los reactores estaban al baño maría donde se conservó una temperatura de 35 °C durante 30 días con agitación constante. Durante este tiempo el sistema se encargó de medir la producción de gas para cada uno de los reactores y sus respectivas muestras (Angelidaki et al., 2009).

Para hacer representativo el experimento, se realizó la digestión por triplicado para cada una de las muestras. Vale la pena aclarar que gracias a que las condiciones dadas por el biorreactor son uniformes para cada muestra, se asegura que el diseño del experimento sea completamente al azar pues ninguna muestra se

puede ver favorecida por una condición externa. Así, el potencial de biogás que en este caso es la variable de respuesta solo se va a ver afectado por el tratamiento, es decir, por el sustrato empleado.

Para determinar el volumen de gas producido se tiene una celda por cada reactor, la cual estaba llena de agua acidificada, esto se hace para que el CO<sub>2</sub> no se disuelva en el agua, lo que afecta los datos obtenidos. Por estas celdas pasa el gas producido, las cuales poseen un interruptor que gira al completar un volumen determinado. Cada celda fue calibrada para determinar cuál es el volumen de cada una con el fin de determinar cuánto gas se produce por cada vez que se active el interruptor.

Para realizar la mezcla entre vinaza y los cosustratos (RAC, bagacillo y miel) se determinó la relación C:N de cada sustrato y luego se calculó qué porcentaje de cada sustrato debía llevar la mezcla para balancear la relación C:N a un aproximado entre 20 y 40, el cual es el rango óptimo para una digestión adecuada.

La vinaza **D** se mezcló con residuos agrícolas de cosechas (RAC) a una razón de 53/47 en peso y se obtuvo un porcentaje de VS de 45.36%, para la segunda combinación la vinaza **D** se mezcló con miel a una razón de 65/35 en peso y se obtuvo un porcentaje de VS de 31.73% y para la última combinación se mezcló vinaza **D** con bagacillo a una razón de 92/8 en peso y se obtuvo un porcentaje de VS de 16.74%.

#### 2.4.2.2 Unidad experimental

La unidad experimental consistió en 30 biodigestores a escala de laboratorio de 1 litro cada uno. Cada biodigestor estaba conectado a un agitador controlado por un motor que permite la homogenización constante. El seguimiento de la producción de biogás se realizó a partir de un medidor de flujo por 30 días para los inóculos y de 15 para los sustratos, el proceso de digestión anaerobia se mantuvo en condiciones mesofílicas (35 °C). Se utilizó una razón 1:6 de %VS de sustrato por %VS de inóculo.

#### 2.4.3 Cuantificación de metano en biogás

El gas producido por cada reactor se acumuló dentro de bolsas colectoras de biogás diseñadas para contener 10 litros de muestra. El contenido de cada recipiente se hizo pasar por un analizador de biogás portable, BIOGAS 5000, equipo capaz de cuantificar la proporción de metano en una muestra gaseosa, lo que determinó la cantidad de metano producida dentro de cada reactor.



**Figura 2.** Equipo BIOGAS 5000.

#### **2.4.4 Análisis estadístico**

Para el tratamiento estadístico de los resultados se empleó una prueba no paramétrica como la de Kruskal-Wallis debido a la falta de condiciones para llevar a cabo un ANOVA (prueba paramétrica), pues los datos no cumplen el supuesto de normalidad. Por lo tanto, una prueba de Kruskal Wallis de múltiples comparaciones se empleó para determinar si existen diferencias significativas entre la producción de gas de los sustratos.

Luego de determinar si hay diferencias entre las medias de las variables de respuesta, se procedió a realizar una prueba Kruskal-Wallis de múltiples comparaciones para establecer cuáles son los tratamientos con una media más alta y así conocer que sustratos, o que combinaciones, tienen un mayor potencial de biogás con una mayor concentración de metano.



### 2.4.5 Matriz de marco lógico

**Tabla 2.** Matriz de marco lógico.

<b>OBJETIVO GENERAL</b>			
Medir la producción de biogás para el bagacillo, la cachaza, el RAC y la vinaza (Residuos del procesamiento de caña de azúcar), y determinar el efecto de las combinaciones de los anteriores en la producción de biogás.			
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>SUPUESTOS</b>	<b>INDICADOR</b>
Caracterizar los sustratos empleados en la digestión anaerobia teniendo en cuenta parámetros como la relación C:N, pH, humedad, y sólidos volátiles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar un análisis elemental de C y N en cada sustrato empleado.</li> <li>Medir el pH de cada sustrato.</li> <li>Determinarle la humedad a cada sustrato.</li> <li>Determinar el porcentaje de sólidos volátiles en cada sustrato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La relación C:N tendrá poca desviación entre las muestras de un mismo sustrato.</li> <li>El pH se mantendrá entre muestras de sustrato.</li> <li>La humedad será uniforme en cada sustrato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datos de la relación C:N para cada sustrato.</li> <li>Tabla con el pH de cada sustrato.</li> <li>Valores de humedad de los sustratos.</li> <li>Porcentajes de sólidos volátiles para cada sustrato.</li> </ul>
Cuantificar la producción de biogás para sustratos y combinaciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recolección de sustratos frescos.</li> <li>Montar las pruebas en biorreactores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los biorreactores funcionarán continuamente durante el tiempo que tomen las pruebas.</li> <li>El contador de gas no se descalibrará y su funcionamiento será normal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grafica de producción de biogás en el tiempo.</li> </ul>

<p>Cuantificar la cantidad de metano en el biogás producido por los sustratos y sus combinaciones.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir el metano producido por cada experimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los recipientes donde se almacena el biogás estarán en perfecto estado y no habrá fuga.</li> <li>• El medidor de gas trabajará de forma correcta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos correspondientes al volumen de metano en el biogás producido por cada muestra.</li> </ul>
<p>Identificar los sustratos y combinaciones que tengan una mejor producción e biogás con metano.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento estadístico de datos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existen diferencias entre usar sustratos individualmente a usar combinaciones de sustratos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de resultados presentados por medio de una prueba de Kruskal-Walis</li> </ul>

## 2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.5.1 Caracterización de sustratos

El porcentaje de humedad y de sólido volátiles de las muestras se llevó a cabo según lo descrito en la metodología. En la tabla 1 se presenta el promedio de los porcentajes obtenidos durante el procedimiento.

**Tabla 3.** Porcentaje de humedad y sólidos volátiles de los diferentes sustratos evaluados.

Muestra	Humedad (%)	VS (%)
RAC	22.3	68.8
Bagazo	16.1	74.6
Bagacillo	24.2	72.6
Cachaza	69.6	19.1
Vinaza C	67.0	25.8
Vinaza D	83.3	11.9
Vinaza A pre	97.0	2.0
Vinaza A pos	62.2	27.7
Vinaza B Pre	92.4	5.3
Vinaza B pos	67.8	24.6

Así mismo, el pH de las muestras se determinó siguiendo la metodología descrita. Los promedios de los valores medidos se presentan en la tabla 4 con su respectiva desviación.

**Tabla 4.** Promedio de pH para las muestras empleadas en la digestión anaerobia.

Muestra	Promedio	Desviación
Miel	5.57	0.0058
Vinaza A Pre	5.03	0.0058
Vinaza A Pos	5.04	0.0208
Vinaza B Pre	4.13	0.0058
Vinaza B Pos	4.26	0.0058
Vinaza C	4.29	0.0000
Vinaza D	4.01	0.0058

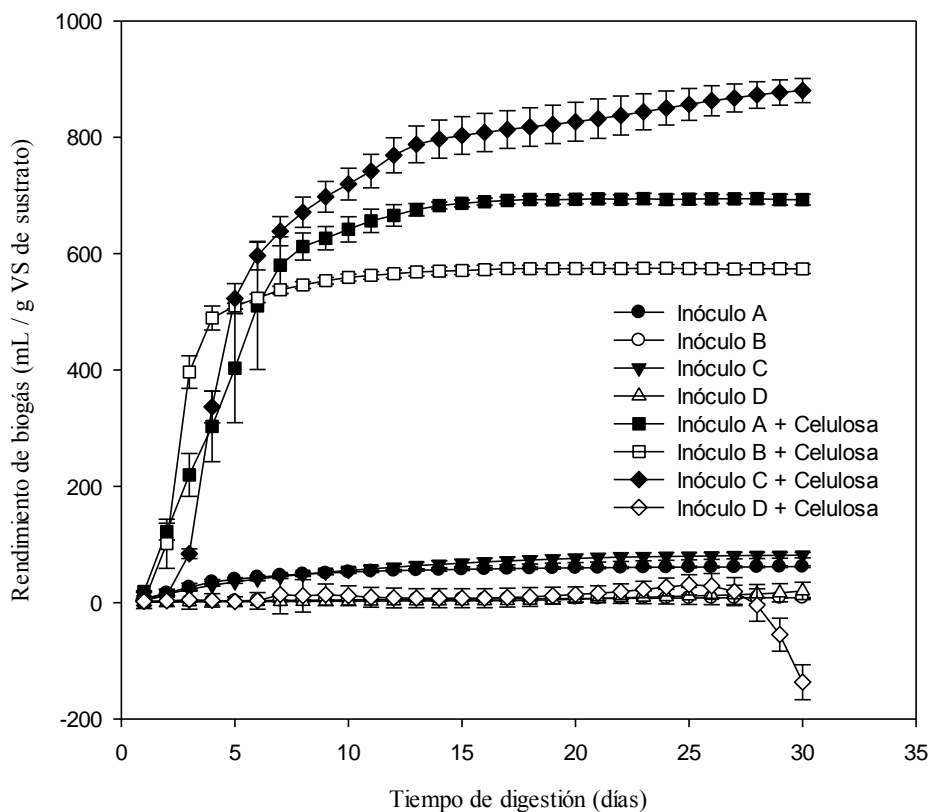
Los resultados de los análisis para la determinación de la relación C:N realizados a los diferentes sustratos se presenta en la tabla 5. Los valores reportados fueron entregados por el ingenio de donde proviene la vinaza **D**. Los valores de las muestras que presentan un asterisco (\*) no se pudieron reportar debido a que los resultados de los análisis no llegaron al momento de escribir este documento.

**Tabla 5.** Relación C/N de los sustratos evaluados.

Muestra	Relación C/N
RAC	51.4
Bagacillo	245
Cachaza	20.4
Miel	*
Vinaza A Pre	*
Vinaza A Pos	*
Vinaza B Pre	*
Vinaza B Pos	*
Vinaza C	*
Vinaza D	11.2

## 2.5.2 Cuantificación de la producción de biogás de los sustratos y combinaciones.

Para evaluar el potencial de biogás de los diferentes residuos de la industria azucarera es fundamental identificar un inóculo base para esas determinaciones. El inóculo base debe ser obtenido de un digestor que se encuentre procesando materia orgánica para que pueda proveer una alta diversidad microbiana que digiera una variedad de moléculas orgánicas. Igualmente, el inóculo debe tener una baja producción de biogás endógeno, lo que significa que debe tener poco sustrato residual que se pueda convertir en biogás (Holliger et al., 2016). Para identificar el inóculo base para los subsiguientes estudios se utilizó celulosa como sustrato standard con cada uno de los inóculos a evaluar (**Gráfica 1**).



**Gráfica 1.** Rendimiento de biogás de diferentes inóculos usando celulosa como sustrato. Se empleó una relación de VS %(w/w) inóculo/ sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos de biogás de los inóculos A, B, C y D poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

El uso de un control positivo es indispensable durante los estudios de BMP, ya que permite la validación de la actividad del inóculo con un sustrato y permite compararla con un valor nominal. Los controles positivos también permiten la validación del procedimiento de cuantificación de gas. La celulosa se usa como control positivo ya que su composición es bien definida, pues está compuesta únicamente por polímeros de glucosa. Además, su propiedad polimérica involucra todas las etapas de degradación en la digestión anaerobia, incluyendo la hidrólisis. Por último, la celulosa es de fácil manejo, bajo costo y se puede conseguir como un producto de alta calidad y pureza (Holliger et al., 2016).

La concentración de sólidos volátiles (VS por sus siglas en inglés) en cada muestra debe ser la misma para tener resultados comparables. La relación VS del inóculo respecto al sustrato es clave para la determinación del BMP (Holliger et al., 2016). En el experimento se empleó una porción mucho más grande de inóculo para minimizar problemas de acidificación e inhibición.

En la Gráfica 1 se observa la producción de biogás durante 30 días utilizando celulosa como sustrato y 4 inóculos diferentes. En la gráfica se observa que el inóculo con mayor rendimiento de biogás a partir de celulosa fue el inóculo **C**, el cual, aunque en los primeros días produjo menos biogás que el inóculo **A**, luego del día 7 aumento su rendimiento. El inóculo **D** no produjo biogás sugiriendo la inviabilidad del consorcio microbiano pues la celulosa no presenta propiedades inhibitorias (Holliger et al., 2016). La inviabilidad pudo ser a causa de las condiciones de transporte y almacenamiento pues provenía de una planta a más de 300 km de Cali.

Según el análisis estadístico presentado en la figura 3 y 4 el inóculo de mayor rendimiento fue el inóculo **C** el cual también provino de otra región del País limitando su acceso. Sin embargo, el inóculo **A** también presenta un buen rendimiento, buena estabilidad (baja producción de biogás residual) y su lugar de procedencia es dentro de los límites de la ciudad de Cali. Por lo tanto, el inóculo base del estudio fue el inóculo **A**.

Prueba de Kruskal-Wallis en the data

Group	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
Inóculo A	6	61,947	21,5	-0,56
Inóculo A- Ceulosa	6	693,756	39,5	2,81
Inóculo B	6	8,269	9,5	-2,81
Inóculo B- Celulosa	6	573,341	33,5	1,68
Inóculo C	6	83,659	27,5	0,56
Inóculo C- Celulosa	6	885,369	45,5	3,93
Inóculo D	6	32,124	15,5	-1,68
Inóculo D- Celulosa	6	-439,325	3,5	-3,93
General	48		24,5	

H = 46,29 GL = 7 P = 0,000

H = 46,31 GL = 7 P = 0,000 (ajustados para los vínculos)

**Figura 3.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de los inóculos con celulosa y sus respectivos blancos. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).

### Kruskal-Wallis: Conclusions

The following groups showed significant differences (adjusted for ties):

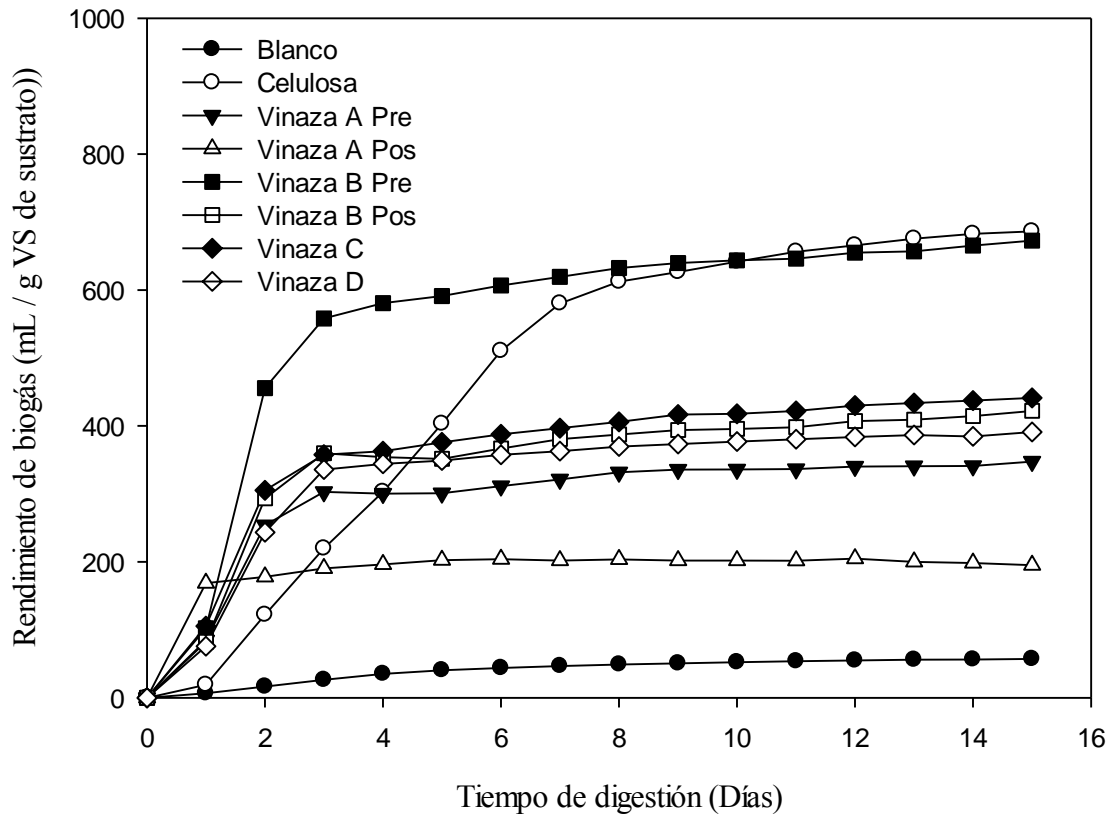
Groups	Z vs. Critical value	P-value
Inóculo C- Celulosa vs. Inóculo D- Celulosa	5,21345 >= 2,121	0,0000
Inóculo A- Ceulosa vs. Inóculo D- Celulosa	4,48599 >= 2,121	0,0000
Inóculo B vs. Inóculo C- Celulosa	4,48599 >= 2,121	0,0000
Inóculo A- Ceulosa vs. Inóculo B	3,75853 >= 2,121	0,0002
Inóculo B- Celulosa vs. Inóculo D- Celulosa	3,75853 >= 2,121	0,0002
Inóculo C- Celulosa vs. Inóculo D	3,75853 >= 2,121	0,0002
Inóculo A vs. Inóculo C- Celulosa	3,08259 >= 2,121	0,0021
Inóculo A- Ceulosa vs. Inóculo D	3,03108 >= 2,121	0,0024
Inóculo B vs. Inóculo B- Celulosa	3,03108 >= 2,121	0,0024
Inóculo C vs. Inóculo D- Celulosa	3,03108 >= 2,121	0,0024
Inóculo A vs. Inóculo A- Ceulosa	2,32767 >= 2,121	0,0199
Inóculo A vs. Inóculo D- Celulosa	2,32767 >= 2,121	0,0199
Inóculo B vs. Inóculo C	2,30362 >= 2,121	0,0212
Inóculo B- Celulosa vs. Inóculo D	2,30362 >= 2,121	0,0212
Inóculo C vs. Inóculo C- Celulosa	2,18237 >= 2,121	0,0291

**Figura 4.** Conclusiones de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de los inóculos con celulosa y sus respectivos blancos. Los grupos de tratamientos que se muestran presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).

Según la metodología propuesta se llevó a cabo la digestión anaerobia de vinazas provenientes de diferentes ingenios de la región, donde se recolectaron las vinazas **A**, **B**, **C** y **D** de las cuales se obtuvo vinazas **Pre** y **Pos** evaporación para las vinazas **A** y **B**. Así mismo se trataron otros residuos agroindustriales (Bagacillo, cachaza, miel y RAC) junto con sus respectivas mezclas con vinaza **D**, esto, con el fin de balancear la relación C:N y determinar si tiene algún efecto en la producción de biogás. La digestión de la cachaza presentó problemas aislados a

las otras digestiones por lo que no se obtuvo datos apropiados para presentar dentro del proyecto. Para algunas muestras sólo se obtuvo un duplicado de los datos debido a que se perdieron algunas pruebas por muerte de inóculo.

Una vez definido el inóculo base, se evaluó el BMP de cuatro muestras de vinazas provenientes de diferentes ingenios de la región (**Gráfica 2**), para dos de ellas, vinazas **A** y **B**, se recolectaron muestras antes (Vinaza A/B Pre) y después (Vinaza A/B Pos) de la evaporación, proceso que se realiza para concentrar este residuo (**Gráfica 3**). Según las figuras **5 y 6**, las vinazas **B pos** y **C** poseen mayor potencial que las vinazas **A pos** y **D**. Estas diferencias están asociadas a la presencia de compuestos inhibitorios y/o a la biodisponibilidad de la materia orgánica, lo cual depende directamente del proceso productivo del azúcar y del etanol.



**Gráfica 2.** Rendimiento de biogás vinazas provenientes de diferentes ingenios en el Valle del Río Cauca. Se empleó una relación de VS inóculo/sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos de las vinazas A (Pre y Pos), B (Pre y Pos), C y D poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).



### Kruskal-Wallis: Multiple Comparisons

Prueba de Kruskal-Wallis en the data

Group	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
Vinaza A Pre	6	344,4	12,5	-1,53
Vinaza A Pos	6	199,3	3,5	-3,82
Vinaza B Pre	6	644,8	33,5	3,82
Vinaza B Pos	6	413,3	21,3	0,72
Vinaza C	6	434,7	22,2	0,93
Vinaza D	6	411,8	18,0	-0,13
General	36		18,5	

H = 27,44 GL = 5 P = 0,000

H = 27,45 GL = 5 P = 0,000 (ajustados para los vínculos)

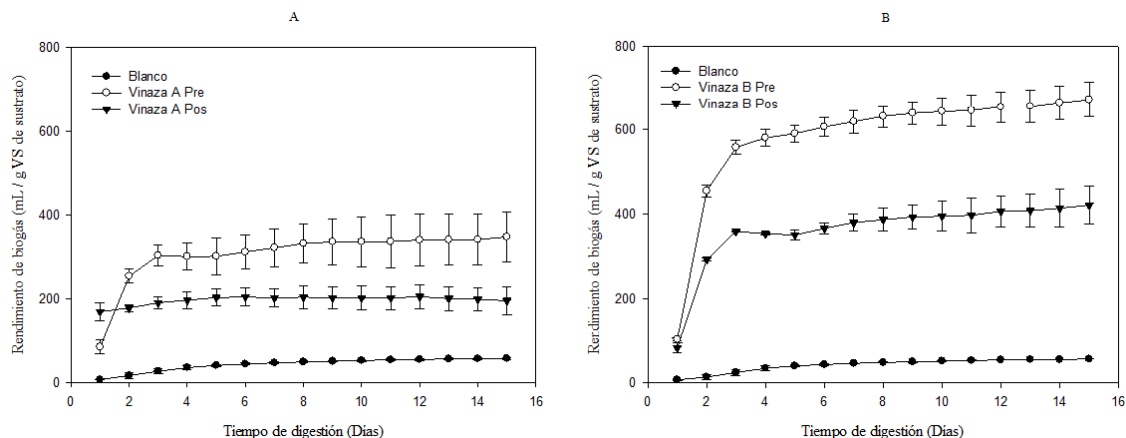
**Figura 5.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de las vinazas. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).

### Kruskal-Wallis: Conclusions

The following groups showed significant differences (adjusted for ties):

Groups	Z vs. Critical value	P-value
Vinaza A Pos vs. Vinaza B Pre	4,93229 $\geq$ 1,857	0,0000
Vinaza A Pre vs. Vinaza B Pre	3,45260 $\geq$ 1,857	0,0006
Vinaza A Pos vs. Vinaza C	3,06898 $\geq$ 1,857	0,0021
Vinaza A Pos vs. Vinaza B Pos	2,93197 $\geq$ 1,857	0,0034
Vinaza B Pre vs. Vinaza D	2,54835 $\geq$ 1,857	0,0108
Vinaza A Pos vs. Vinaza D	2,38394 $\geq$ 1,857	0,0171
Vinaza B Pre vs. Vinaza B Pos	2,00032 $\geq$ 1,857	0,0255
Vinaza B Pre vs. Vinaza C	1,86331 $\geq$ 1,857	0,0324

**Figura 6.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de las vinazas. Los grupos de tratamientos que se muestran presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).



**Gráfica 3.** Rendimiento de biogás de la vinaza **A** (**A**) y vinaza **B** (**B**) pre- y pos-evaporación. Se empleó una relación de VS inóculo/sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos de las vinazas en **A** y en **B** poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

La Gráfica 3 muestra el rendimiento de las vinazas **A** (Gráfica 3.A) y vinaza **B** (Gráfica 3.B) por separado donde se comparan las muestras **Pre** y **Pos**-evaporación. Se evidencia que para la vinaza **A** (Gráfica 3.A) hay diferencias significativas (Figura 7) entre el rendimiento de biogás entre muestras **Pre** y **Pos**-evaporación. Lo mismo se observa con la vinaza **B** (Gráfica 3.B), donde el BMP de la muestra **Pre**-evaporación es casi 2 veces mayor a la de la muestra **Pos**-evaporación (Figura 8). Este resultado sugiere la presencia de compuestos inhibitorios en las vinazas **A** y **B**, pues luego del proceso de evaporación estos aumentan de concentración y por tanto su efecto inhibitorio durante la biodigestión. Por otra parte, el BMP de la vinaza **A** es inferior al de las vinazas **B** y **C** (Gráfica 2) por lo que es posible suponer una menor biodisponibilidad de la materia orgánica o una mayor concentración de compuestos inhibitorios, la cual debe ser evaluada en estudios posteriores.

Prueba de Kruskal-Wallis en Rendimiento de biogás (mL/gVS)

Muestra	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
Vinaza A Pos	6	199,3	3,5	-2,88
Vinaza A Pre	6	344,4	9,5	2,88
General	12		6,5	

H = 8,31 GL = 1 P = 0,004

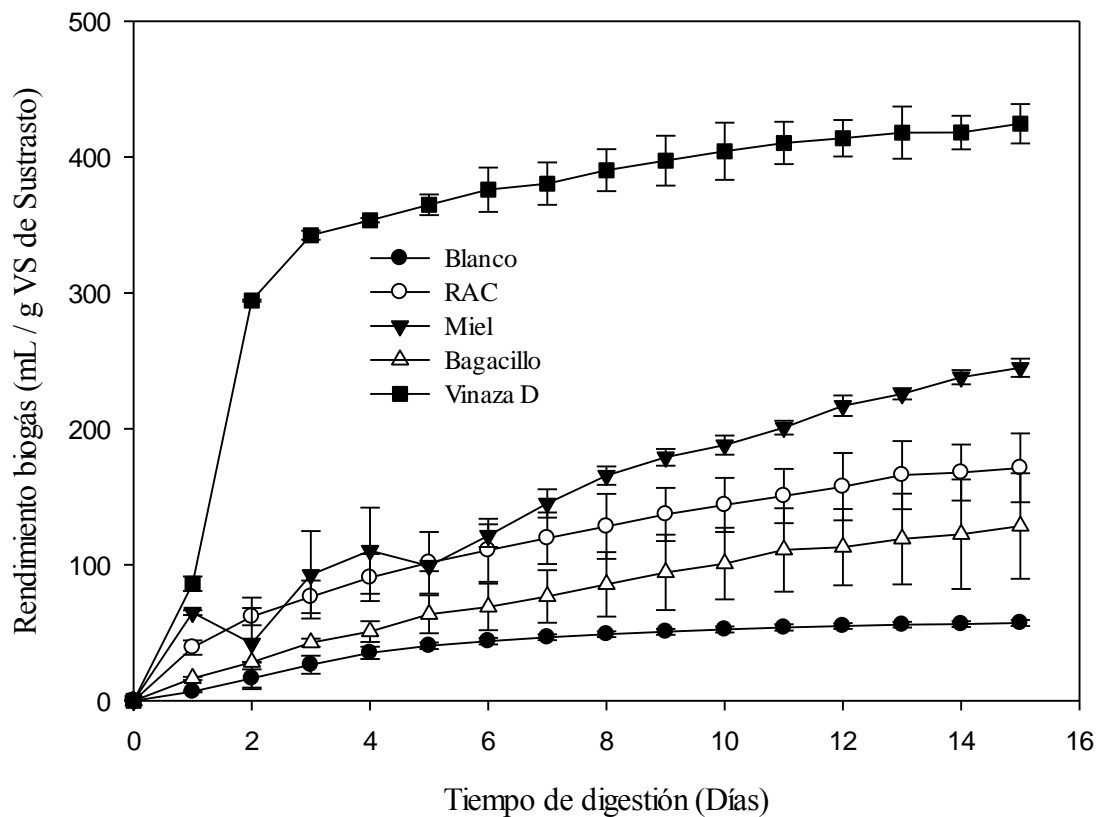
**Figura 7.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de las vinazas A Pre y Pos. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).

Prueba de Kruskal-Wallis en Rendimiento de biogás (mL/gVS)

Muestra	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
Vinaza B Pos	6	413,3	3,5	-2,88
Vinaza B Pre	6	644,8	9,5	2,88
General	12		6,5	

H = 8,31 GL = 1 P = 0,004

**Figura 8.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de las vinazas B Pre y Pos. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).



**Gráfica 4.** Rendimiento de biogás residuos agroindustriales provenientes de la industria azucarera en el Valle del Río Cauca. Se empleó una relación de VS inóculo/sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos de las vinazas A, B, C y D poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

Se llevó a cabo la digestión de los residuos agroindustriales diferentes a vinaza (Bagacillo, miel y RAC), el rendimiento de biogás obtenido hasta el día 15 para los sustratos se reporta en la gráfica 4. Las figuras 9 y 10 muestran que por parte de los sustratos lignocelósicos se presenta un comportamiento distinto al comportamiento de la vinaza D, ya que al principio de la digestión la vinaza produce la mayor cantidad de biogás, mientras que para los otros materiales se observa que los primeros días la producción de gas es poca y a medida que pasan los días se incrementa el rendimiento. Como se mencionó anteriormente, para determinar el verdadero BMP de los sustratos lignocelulósicos se debería mantener la digestión hasta que la producción de biogás cese, y como se puede evidenciar en la gráfica 4, estos sustratos seguían produciendo biogás en el día 15. Teniendo esto en cuenta se puede concluir que la cinética de la digestión de los materiales lignocelulósicos es menor que la cinética de la vinaza. Esto, debido

a la recalcitrancia de los sustratos lignocelulósicos causada por su composición entre celulosa, hemicelulosa y lignina, donde estos últimos dos presentan gran resistencia a la degradación.

### Kruskal-Wallis: Multiple Comparisons

Prueba de Kruskal-Wallis en the data

Group	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
RAC	6	167,9	8,8	-1,47
Miel	6	237,2	15,5	1,20
Bagacillo	6	121,9	4,2	-3,33
Vinaza D	6	420,6	21,5	3,60
General	24		12,5	

H = 20,75 GL = 3 P = 0,000

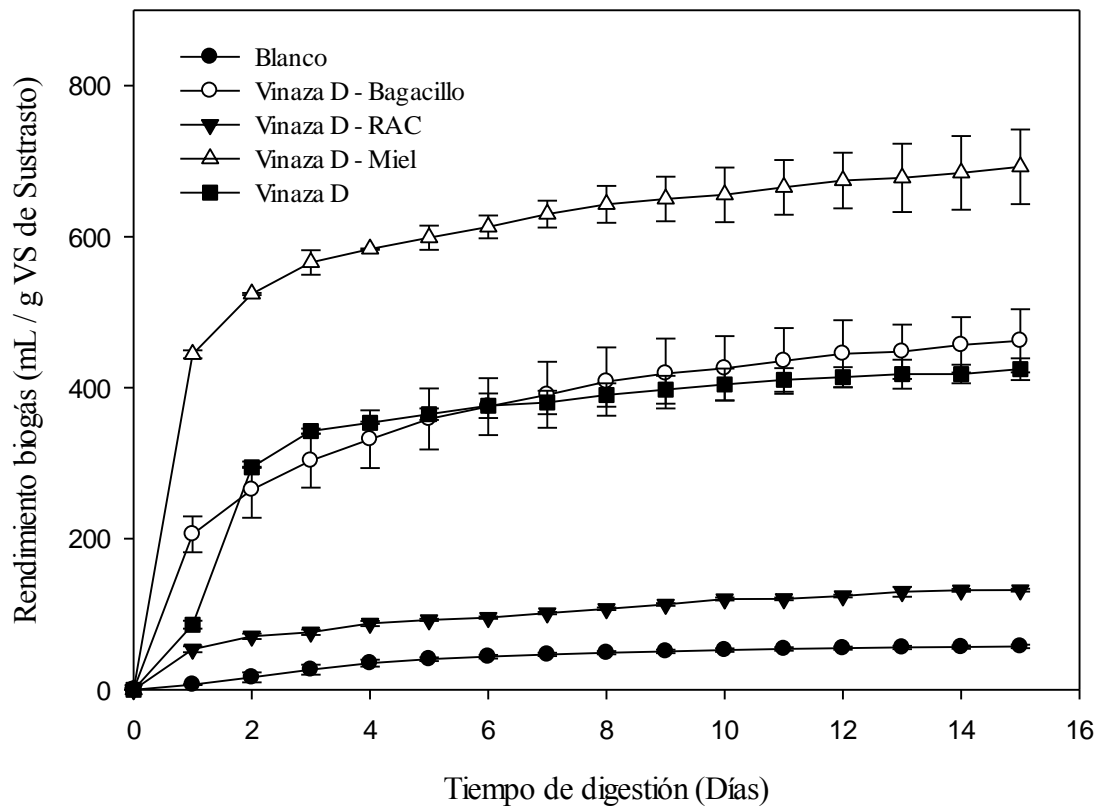
**Figura 9.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de los residuos agroindustriales. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).

### Kruskal-Wallis: Conclusions

The following groups showed significant differences:

Groups	Z vs. Critical value	P-value
Bagacillo vs. Vinaza D	4,24578 >= 1,388	0,0000
RAC vs. Vinaza D	3,10269 >= 1,388	0,0019
Miel vs. Bagacillo	2,77609 >= 1,388	0,0055
RAC vs. Miel	1,63299 >= 1,388	0,0025
Miel vs. Vinaza D	1,46969 >= 1,388	0,0016

**Figura 10.** Conclusiones de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de los residuos agroindustriales. Los grupos de tratamientos que se muestran presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).



**Gráfica 5.** Rendimiento de biogás de vinaza D codigerida con varios sustratos. Se empleó una relación de VS inóculo/sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos de las mezclas poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

La vinaza posee una relación C:N 12:1 en promedio (Janke et al., 2015a) siendo esta inadecuada para los procesos de digestión anaerobia, ya que lo recomendado es entre 20:1 y 40:1 (Janke et al., 2015b). Una relación C:N por fuera del anterior rango está asociada a bajos niveles de biogás y la subsecuente falla del sistema debido a la alta producción de amoníaco (Janke et al., 2015a). Por tal motivo, se evaluó la codigestión de la vinaza con sustratos de alto contenido de carbono disponibles dentro de un ingenio. La vinaza **D** se mezcló con RAC, miel o bagacillo para obtener una relación C:N de aproximadamente 30:1 en todos los casos (**Gráfica 5**). De acuerdo a los resultados del análisis estadístico presentado en las figuras 11 y 12, la codigestión de la vinaza con la miel del proceso incrementa el BMP de la vinaza al aumentar la relación C:N. No se observa el mismo efecto con los otros cosustratos evaluados (RAC y bagacillo) a pesar de nivelar equiparablemente la relación C:N. Esto, puede ser a causa de la biodisponibilidad del carbono pues tanto el RAC como el bagacillo son materiales

más recalcitrantes que la miel. El carbono del RAC y el bagacillo se encuentra principalmente como lignocelulosa, mientras que en la miel está como monosacáridos y disacáridos.

### Kruskal-Wallis: Multiple Comparisons

Prueba de Kruskal-Wallis en the data

Group	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
Vinaza D-Bagacillo	6	452,8	14,5	0,80
Vinaza D-RAC	6	131,7	3,5	-3,60
Vinaza D-Miel	6	683,7	21,5	3,60
Vinaza D	6	420,6	10,5	-0,80
General	24		12,5	

H = 20,40 GL = 3 P = 0,000

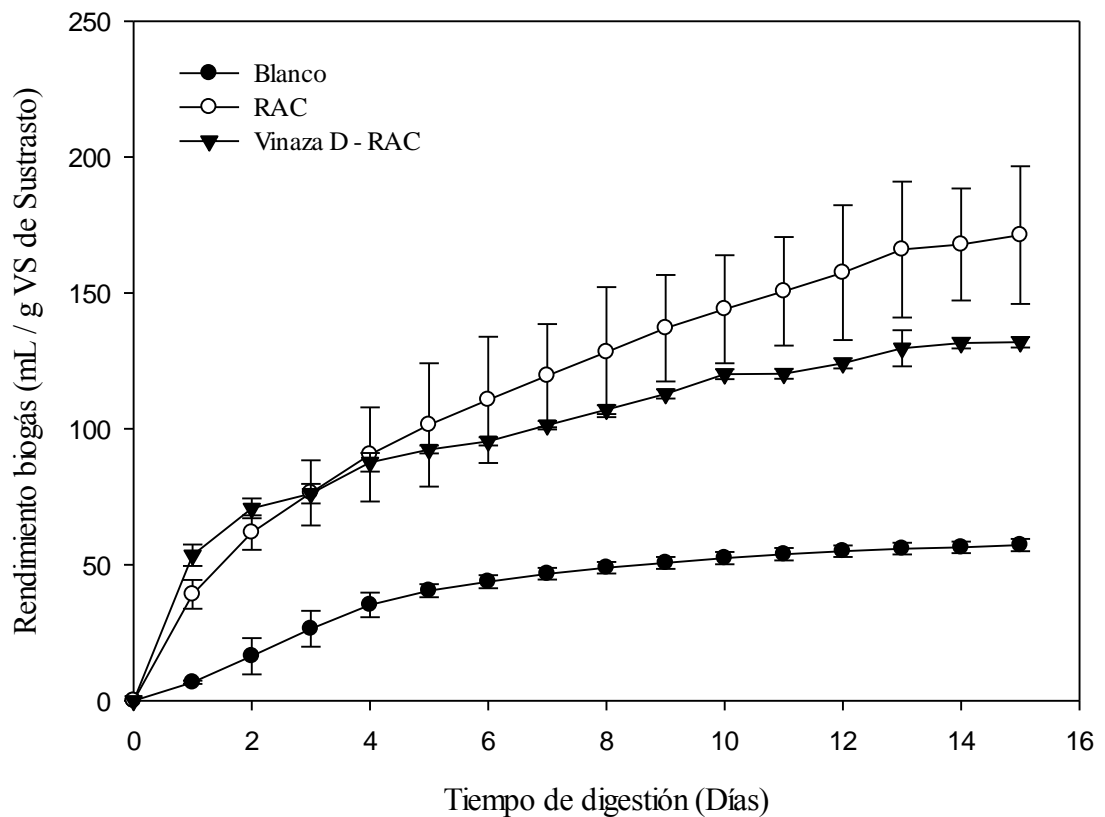
**Figura 11.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de las diferentes mezclas entre los residuos agroindustriales y la vinaza D. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).

### Kruskal-Wallis: Conclusions

The following groups showed significant differences:

Groups	Z vs. Critical value	P-value
Vinaza D-RAC vs. Vinaza D-Miel	4,40908 >= 1,411	0,0000
Vinaza D-Bagacillo vs. Vinaza D-RAC	2,69444 >= 1,411	0,0071
Vinaza D-Miel vs. Vinaza D	2,69444 >= 1,411	0,0071
Vinaza D-Bagacillo vs. Vinaza D-Miel	1,71464 >= 1,411	0,0084
Vinaza D-RAC vs. Vinaza D	1,71464 >= 1,411	0,0089

**Figura 12.** Conclusiones de la prueba no para métrica de Kruskal-Wallis para el BMP de las diferentes mezclas entre los residuos agroindustriales y la vinaza D. Los grupos de tratamientos que se muestran presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).



**Gráfica 6.** Rendimiento de biogás del RAC y de su mezcla con vinaza D. Se empleó una relación de VS inóculo/sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos del RAC y su mezcla con vinaza **D** poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

En la gráfica **6** se presenta el BMP del RAC y la mezcla entre vinaza **D** y RAC, donde se puede apreciar que los primeros dos días la mezcla posee una mayor producción, pero luego del día 3 el RAC arroja un mejor rendimiento. En la figura **13** se presenta el resultado del análisis estadístico entre los valores de producción de biogás de estas dos muestras. Este resultado no era de esperarse, pues el comportamiento que se pretendía ver era de un aumento en la producción de biogás de la mezcla. A partir de este comportamiento se propone que se realice esta prueba de nuevo para verificar el resultado obtenido, o en su defecto, descartarlo.



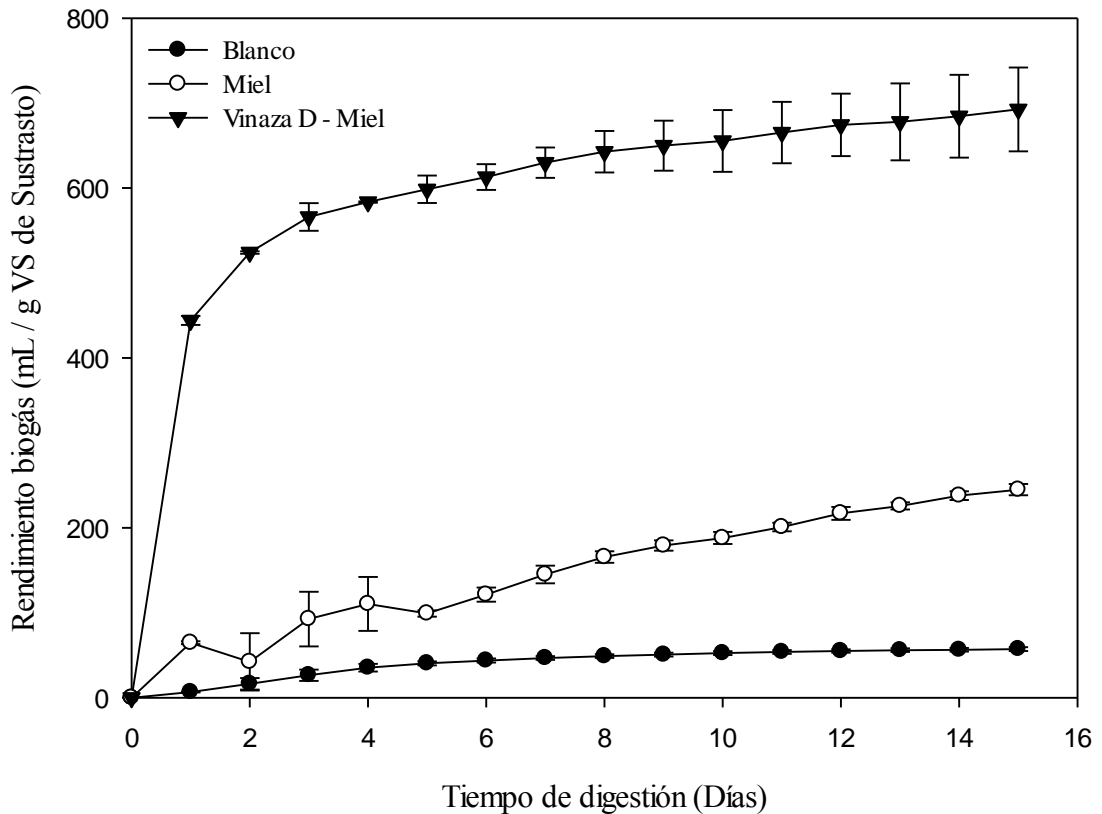
### Prueba de Kruskal-Wallis: Rendimiento de biogás (mL/gVS) vs. Muestra

Prueba de Kruskal-Wallis en Rendimiento de biogás (mL/gVS)

Muestra	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
RAC	6	167,9	9,5	2,88
Vinaza D-RAC	6	131,7	3,5	-2,88
General	12		6,5	

H = 8,31 GL = 1 P = 0,004

**Figura 13.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP del RAC y su mezcla con vinaza D. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).



**Gráfica 7.** Rendimiento de biogás de miel y su combinación con vinaza D. Se empleó una relación de VS inóculo/sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos de estas dos muestras poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

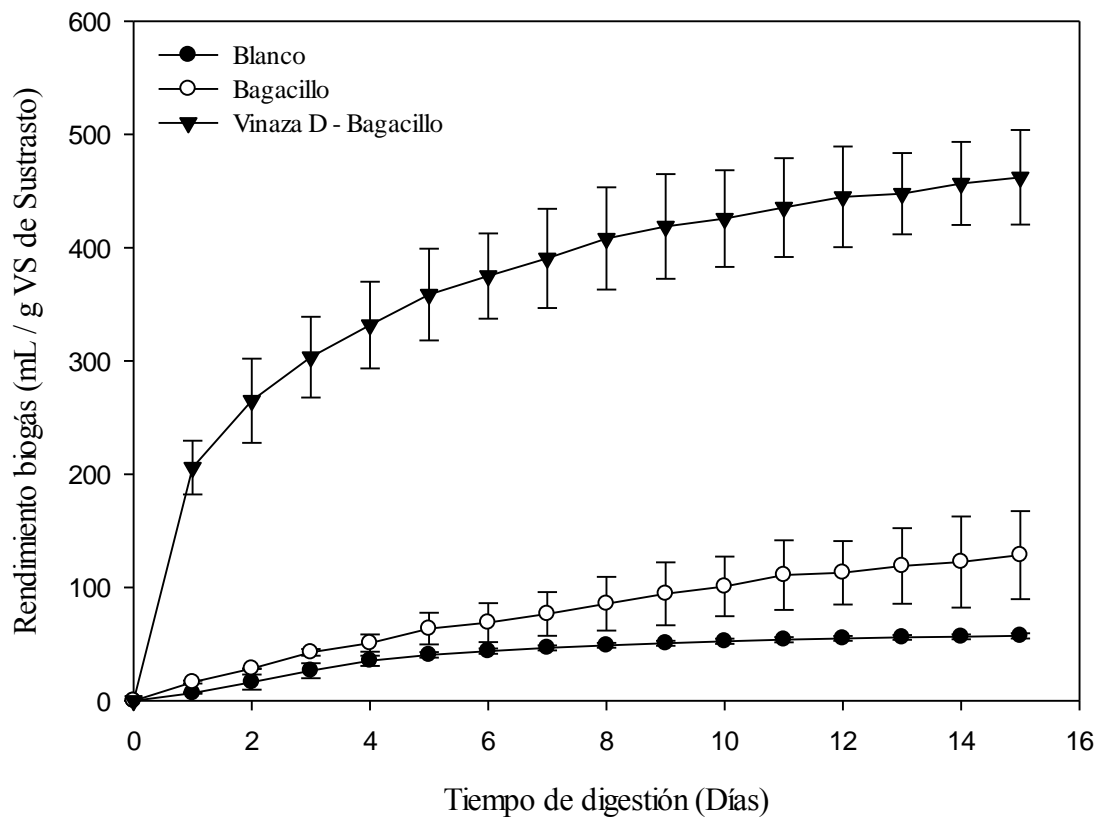
La mezcla entre vinaza y miel mostró un mayor BMP que la muestra de miel como se presenta en la gráfica 7 y en la figura 14. Para la muestra de miel se observa que los primeros 5 días la producción de gas fue muy inestable, lo que podría explicarse a través de la necesidad del inóculo de adaptarse al sustrato a digerir, conllevando a una disminución en la producción de gas mientras lleva a cabo este proceso. Sin embargo, en la mezcla con vinaza **D** se observa que la cinética fue muy estable y que su rendimiento respecto al de la miel fue varias veces mayor.

Prueba de Kruskal-Wallis en Rendimiento de biogás (mL/gVS)

Muestra	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
Miel	6	237,2	3,5	-2,88
Vinaza D-Miel	6	683,7	9,5	2,88
General	12		6,5	

H = 8,31 GL = 1 P = 0,004

**Figura 14.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP de la miel y su mezcla con vinaza D. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).



**Gráfica 8.** Rendimiento de biogás del bagacillo y de su mezcla con vinaza D. Se empleó una relación de VS inóculo/sustrato de 6:1. Cada punto es el promedio de la medición de dos reactores. Según la prueba de Kruskal Wallis los rendimientos de las dos muestras poseen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

En la gráfica 8 se presenta el rendimiento de biogás del bagacillo y de su combinación con vinaza D. La combinación de bagacillo con vinaza D presenta una mejora significativa respecto a la producción de gas del bagacillo como se presenta en la figura 15.

Prueba de Kruskal-Wallis en Rendimiento de biogás (mL/gVS)

Muestra	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
Bagacillo	6	121,9	3,5	-2,88
Vinaza D-Bagacillo	6	452,8	9,5	2,88
General	12		6,5	

$$H = 8,31 \quad GL = 1 \quad P = 0,004$$

**Figura 15.** Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para el BMP del bagacillo y su mezcla con vinaza D. Se tomaron los 6 valores más grandes de BMP de cada tratamiento. Los tratamientos poseen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ).

### 2.5.3 Identificación de los sustratos y combinaciones que tengan una mejor producción de biogás con metano.

**Tabla 6.** Rendimiento de biogás de las vinazas luego de 15 días de digestión.

Muestra	Rendimiento de biogás (NmL/gVS)
Inóculo	57 ± 02
Vinaza A Pre	347 ± 43
Vinaza A Pos	195 ± 23
Vinaza B Pre	693 ± 27
Vinaza B Pos	422 ± 32
Vinaza C	473 ± 36
Vinaza D	424 ± 10

Teniendo en cuenta los rendimientos de biogás de la **tabla 6** y los resultados de las pruebas estadísticas se evidencia que la vinaza con mayor producción de gas fue la vinaza **B Pre**. A partir de la misma tabla también se puede observar que existe una gran variación en los rendimientos de las vinazas, esto es debido a diferentes factores que influyen durante el proceso de digestión anaerobia. Puede deberse a problemas de inhibición con el inóculo, hasta problemas con los flujómetros, que son los encargados de medir la producción de gas. Estas variaciones también pueden presentarse debido a la variación de los procesos industriales de los ingenios de donde son obtenidas las vinazas.

**Tabla 7.** Rendimiento de biogás de los residuos agroindustriales luego de 15 días de digestión.

<b>Muestra</b>	<b>Rendimiento de biogás (NmL/gVS)</b>
Bagacillo	128 ± 27
Miel	245 ± 05
RAC	171 ± 18

Dentro de los residuos agroindustriales evaluados en las pruebas (Bagacillo, miel y RAC) se puede concluir que la miel posee un mayor potencial de producción de biogás como se puede ver en la **tabla 7**. Los análisis estadísticos de las **figuras 9** y **10** muestran que el potencial de biogás del bagacillo y del RAC no poseen diferencias significativas entre ellos. Este resultado era de esperarse, debido a que estos dos son residuos con un alto porcentaje de compuestos lignocelulósicos, lo cual hacen que sean recalcitrantes. Por el contrario, la miel posee moléculas más simples de digerir como monosacáridos y disacáridos que permiten un fácil aprovechamiento por parte del inóculo.

**Tabla 8.** Rendimiento de biogás de las combinaciones de vinaza D y residuos agroindustriales luego de 15 días de digestión.

<b>Muestra</b>	<b>Rendimiento de biogás (NmL/gVS)</b>
Vinaza D-Bagacillo	461 ± 31
Vinaza D-Miel	692 ± 35
Vinaza D-RAC	132 ± 02

En la **tabla 8** se presentan los rendimientos de las mezclas entre la vinaza **D** y los residuos agroindustriales (Bagacillo, miel y RAC). Según el análisis estadístico que se llevó a cabo entre los valores de los diferentes tratamientos, se obtuvo que existen diferencias significativas estadísticamente entre cada uno de los sustratos y su mezcla con vinaza **D** presentados en la gráfica **5**. Lo que quiere decir que la codigestión de estos sustratos con vinaza sí tiene un efecto en la producción de biogás. Para el caso del bagacillo y la miel se observa que su codigestión con vinaza tiene un mayor potencial que si se usa solo la miel o el bagacillo. Por el

contrario, para el caso del RAC, se observa que la codigestión con vinaza tiene un efecto negativo en la producción de biogás. Lo que llama la atención de estos resultados es que al comparar la producción de gas entre la miel y su codigestión, se encuentra que la codigestión aumentó más de dos veces el rendimiento.

#### 2.5.4 Cuantificación de la cantidad de metano en el biogás producido de los sustratos evaluados.

Para determinar el porcentaje de metano de las muestras se empleó el Biogás 5000, el cual requería un volumen mínimo de gas de 1 litro para poder llevar a cabo el análisis de gases. Muchas de las muestras no produjeron el volumen necesario para poder realizar la medición. Según Van Lier, el porcentaje de metano dentro de una muestra de biogás producido por digestión anaerobia no sólo depende del tipo de sustrato digerido sino principalmente de la naturaleza del inóculo, es decir, el porcentaje de metano va a ser similar en todas las muestras sin importar que sustrato se esté digiriendo (Van Lier, Tilche, Ahring, & Digestión, 1999). Por lo anterior, se calculó el promedio del porcentaje de metano medido en las muestras disponibles, y se estableció el valor aproximado de metano para el resto de las muestras. Dicho valor se encuentra reportado en la tabla 9.

**Tabla 9.** Promedio del porcentaje de metano en las muestras.

Porcentaje de metano (%)	Promedio (%)	Desviación
59.7	63.4	3.22
63.5		
65.9		
59.8		
64.3		
62.8		
69.4		
61.8		

## 2.6 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para el potencial de biogás de los sustratos evaluados presentan el comportamiento esperado, pues se evidenció que en general, las vinazas tienen un mayor potencial que los otros residuos agroindustriales como el bagacillo, la miel y el RAC, que como se explicó anteriormente, se debe a el tipo de compuestos que constituyen a cada sustrato. Las vinazas presentaron variedad en su potencial de biogás según el ingenio de procedencia, por lo que se concluye que los procesos industriales que se le realizan a las vinazas son los factores determinantes en su potencial de producción.

Para el potencial de las vinazas Pre y Pos evaporación se puede concluir que las vinazas pre evaporadas poseen un mayor potencial, pues en los dos casos se evidenció que las muestras sin evaporar (diluidas) produjeron mucho más biogás que las muestras evaporadas (concentradas). Esto puede deberse a la presencia de compuestos inhibitorios dentro de las vinazas, como es el caso de antibióticos (que se emplean a lo largo del proceso industrial) que se concentran en la vinaza al momento de la evaporación del agua. Según el análisis anterior, en el caso que un ingenio quisiera emplear vinaza como sustrato en una planta de biogás, sería más beneficioso emplear la vinaza diluida que la vinaza concentrada, pues no solo va a producir más biogás, sino que le ahorraría el gasto energético que se realiza durante la evaporación de la vinaza. Por este motivo sería interesante realizar un análisis tecnoeconómico para determinar las implicaciones en el escalonamiento del proceso por la diferencia del volumen entre las vinazas.

La codigestión del bagacillo y la miel con la vinaza arrojó resultados importantes respecto a la relación C:N, que como se planteó anteriormente, es un factor determinante en la digestión anaerobia. Al balancear esta relación con ayuda de la vinaza se generó una mayor cantidad de gas respecto a la monodigestión del sustrato. La conclusión más importante a partir de esto es que al balancear la relación C:N de los cosustratos se puede llegar a alcanzar rendimientos mayores que los de la vinaza, a escala industrial esto implicaría el uso no solo de un sustrato sino de diferentes cosustratos y así darle un valor agregado a los diferentes residuos agroindustriales que se producen dentro de un ingenio azucarero.

A partir de los potenciales de biogás obtenidos durante las pruebas se puede afirmar que las vinazas son buenas fuentes de generación de gas, así mismo la combinación de miel y vinaza sería muy útil dentro de un proceso industrial de producción de biogás. Como se dijo anteriormente, este tipo de estudio es fundamental para la industria al momento de realizar el diseño de una planta de biogás, ya que como se pudo evidenciar en los resultados, los sustratos poseen características diferentes entre ellos y entre los mismos tipos de sustratos, como

se presentó en la vinaza. Por esto es necesario llevar a cabo pruebas reproducibles a escala de laboratorio que puedan simular un proceso a gran escala.



## 2.7 RECOMENDACIONES

Se recomienda emplear cromatografía de gases para llevar a cabo la determinación del porcentaje de metano en las muestras, pues a pesar de que el BIOGAS 5000 realiza unas lecturas rápidas y precisas, posee la gran desventaja de necesitar como mínimo un litro de muestras de gas para poder determinar el porcentaje de metano.

Realizar más de 3 montajes para cada muestra de sustrato a evaluar, ya que se pueden presentar inconvenientes con los equipos o con el inóculo como tal, esto, con el fin de prevenir pérdida de datos, así, en caso de que la prueba, se tiene otra de respaldo. Así mismo, se recomienda realizar pruebas con más sustratos y con muestras de diferentes ingenios, pues se evidenció que dependiendo del ingenio las muestras poseen un potencial de biogás diferente.

Durante la digestión anaerobia de los sustratos se recomienda medir el pH y el porcentaje de metano continuamente ya que estos factores también son importantes al momento de diseñar una planta. Al final de la digestión se recomienda evaluar las características del digestato para tener en cuenta la concentración de nitrógeno, fósforo y otros compuestos de interés.

### 3.1 REFERENCIAS

- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., ... Lier, J. B. Van. (2009). Defining the biomethane potential ( BMP ) of solid organic wastes and energy crops : a proposed protocol for batch assays, 927–934. <http://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Angelis-dimakis, A., Biberacher, M., Dominguez, J., Fiorese, G., Gadocha, S., Gnansounou, E., ... Robba, M. (2011). Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1182–1200. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.049>
- Aristizábal, C. (2015). Physicochemical characterization of a stillage resulting of alcohol production through the use of sugar cane in a liquor industry, 6(2), 36–41.
- Batista, M. (1998). INTERACTION OF SUGARCANE INDUSTRY RESIDUES WITH SOIL, KAOLINITE, AND Fe-OXIDES.
- Cendales L, E. D. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Bogotá D,C: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería. Recuperado el 11 de agosto de 2014.
- Cerón, V. Z. (2013). CHARACTERIZATION OF STILLAGE FROM SUGAR CANE WASTE FROM THE PRODUCTION OF ETHANOL, 124–131.
- Cobos, Y. L., & Sierra, R. (2007). EVALUACION DEL POTENCIAL DE LA PRODUCCION DE BIOGAS A PARTIR DE VINAZAS EN UN BIODIGESTOR ANAEROBIO.
- Díaz, a. (2013). Diseñor, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anerobio con residuos orgánicos.
- Díaz, B. M. C., Espitia, V. S. E. & Molina, P. F. (2002). Digestión Anaerobia: Una Aproximación A La Tecnología, Bogotá, Unilibros,63.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources. Weinheim: Wiley .
- Doelsch, E., Masion, A., Cazevieuille, P., & Condom, N. (2009). Spectroscopic characterization of organic matter of a soil and vinasse mixture during aerobic or anaerobic incubation. *Waste Management*, 29(6), 1929–1935. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.009>

- El-mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Bioresource Technology Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, 101(11), 4021–4028. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.027>
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates, 1–8.
- Fernández, G. L. A. (2005). Caracterización Cinética De La Degradación Anaerobia Termofílica Seca De La Forsu. Efecto De Diferentes Pretratamientos Sobre La Biodegradabilidad Del Residuo. Tesis Doctoral, Universidad De Cádiz.
- Fontes, J. L., Rubio, M. A., & Pizzio, L. (2004). Química Sustentable. Argentina: Edición UNL.
- Garcés, L. A., Reyes, J. P., & Gutierrez, P. A. (2014). Producción de Biogás a partir de residuos agrícolas.
- Giordano, G. E. L. F. A. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes, 325–341. <http://doi.org/10.1007/s11157-012-9277-8>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., ... Andrade, D. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests Uncorrected Proof, 1–9. <http://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., & Liebetrau, J. (2015a). Biogas Production from Sugarcane Waste: Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing, 20685–20703. <http://doi.org/10.3390/ijms160920685>
- Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., & Liebetrau, J. (2015b). Biogas Production from Sugarcane Waste: Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing, 1–19. <http://doi.org/10.3390/ijms160920685>
- Khalid, A., Muhammad, A., Muzammil, A., Mahmood, T. & Dawson, L. (2011). Review: The Anaerobic Digestion Of Solid Organic Waste. *Waste Management*, 31, 1737-1744.
- Leal, I., Chirinos, E., Leal, M., . Morán, H., & Barrera, W. (2003). Caracterización fisicoquímica de la vinaza del Agave cocui y su posible uso agroindustrial.
- Mariscal, J. P., & Camargo, M. A. (2015). Alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios, 9833.
- Martinelli, L., & Filoso, S. (2008). EXPANSION OF SUGARCANE ETHANOL PRODUCTION IN BRAZIL : ENVIRONMENTAL AND SOCIAL CHALLENGES,

18(4), 885–898.

Meunchang, S., Panichsakpatana, S., & Weaver, R. W. (2005). Co-composting of filter cake and bagasse ; by-products from a sugar mill, 96, 437–442. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.024>

Mijangos-cortes, J. O., Barahona-pérez, L. F., España-gamboa, E. I., Mijangos-cortés, J. O., Hernández-zárate, G., & Maldonado, J. A. D. (2011). Vinasses : Characterization and treatments Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor, (November). <http://doi.org/10.1186/1754-6834-5-82>

Mussati, M., Aguirre, P., Scenna, N. Modelado, simulación y optimización de procesos químicos. Capítulo XVIII: Modelado del proceso de digestión anaerobia en reactores simples. Editor: Nicolás J. Scenna; Universidad Tecnológica Nacional-CONICET. Santa Fé, Argentina, 1999.

Robles-gonzález, V., & Villalobos-castillejos, F. (2008). Vinazas Mezcaleras : Un problema de contaminación ambiental.

Samer, M. (n.d.). Biogas Plant Constructions.

Seiffert, M., Kaltschmitt, M., & Miranda, J. A. (2009). The biomethane potential in Chile. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 564–572. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.005>

Tiwari, G. N., Singh, S. k, & Thakur, K. (1992). Design criteria for an active biogas plant, 17(10), 955–958.

Van Lier, J. B., Tilche, A., Ahring, B. K., & Digestion, A. (1999). New perspectives in anaerobic digestion.

Varnero, M. T. (2011). Manual de biogás. Santiago de Chile: FAO. ISBN 978-95-306892-0.

Zumalacárregui, L., Pérez, O., Lombardi, G., Rodríguez, P., & Zumalacárregui, B. (2008). Calculation of the environmental benefit of sugar cane for the production of fuel ethanol, 71(1), 65–71.

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES**

Yo, María Francisca Villegas, directora del proyecto de grado: "*Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar*", realizado por el estudiante **Oliver Otero Guerrero**, certifico que el estudiante atendió todas las recomendaciones y correcciones realizadas por el evaluador Andrés Felipe Dávalos.

**Cordialmente,**

María Francisca Villegas (Nombre)

Ma. Francisca Villegas (Firma del Profesor)  
Agosto 22 del 2017 (Fecha)