

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Influencia de la dilución sobre la digestión anaerobia de la Cachaza, residuo producido en la agroindustria panelera de Colombia

Por:

Glen Bryan Madrigal Pérez

Asesor:

Ing. Verónica Haydee Pari Mamani

Juliaca, Setiembre de 2019

**DECLARACIÓN JURADA
DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS**

Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: ***“INFLUENCIA DE LA DILUCIÓN SOBRE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA CACHAZA, RESIDUO PRODUCIDO EN LA AGROINDUSTRIA PANELERA DE COLOMBIA”*** constituye la memoria que presenta el **Bachiller Glen Bryan Madrigal Pérez** para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Ambiental ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en *Juliaca*, a los 26 días del mes de setiembre del año 2019



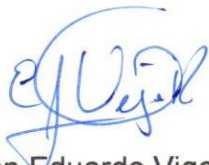
Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani

Influencia de la dilución sobre la digestión anaerobia de la cachaza,
residuo producido en la agroindustria panelera de Colombia

TESIS

Presentada para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

JURADO CALIFICADOR



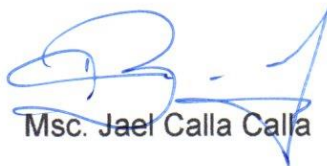
Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

Presidente



MSc. Rose Adeline Callata Chura

Secretaria



Msc. Jael Calla Calla

Vocal



Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani

Asesora

Juliaca, 26 de Setiembre de 2019

Dedicatoria

A Dios, el mejor ingeniero del mundo y a quien debo todo por darme la vida, fortaleza y sabiduría para seguir adelante.

A mi mamá Natividad Pérez Feijoo, por brindarme todo su apoyo y colaboración en este largo camino.

A mis hermanos quienes siempre estuvieron dándome consejos y ánimos para continuar con mis estudios.

A mis compañeros de estudios y amigos con quienes compartí agradables momentos durante mi vida universitaria.

Agradecimientos

A la profesora Liliana del Pilar Castro Molano y al profesor Humberto Escalante por haberme dado la oportunidad de pertenecer al grandioso grupo de “Digestión Anaerobia” de la Universidad Industrial de Santander (UIS, Colombia); así mismo, por el tiempo, orientación y guía para la ejecución de la investigación; son los mejores maestros.

A Oscar Mendieta y Lizeth Gonzales por ser los mejores compañeros de trabajo.

Al profesor Russel Allidren Lozada Vilca y Juan Eduardo Vigo Rivera por su apoyo incondicional y guía.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) por brindarme la oportunidad de estudiar en la UPeU durante los 5 años.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	14
1.1. Identificación del problema	14
1.2. Justificación	17
1.3. Presuposición filosófica.....	18
1.4. Objetivos de la investigación.....	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	20
2.1. Antecedentes.....	20
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	20
2.1.2. Antecedentes nacionales	21
2.2. Revisión de literatura	22
2.2.1. La panela.....	22
2.2.2. Etapas del proceso productivo de la panela	22
2.2.3. Subproductos de la panela	24
2.2.4. La digestión anaerobia (DA)	24
2.2.5. Ensayos de potencial bioquímico de metano (PBM).....	26
2.2.6. Variables del proceso de DA.	28
2.2.7. Modelamiento cinético	30
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1. Tipo de investigación.....	31
3.2. Diseño de la investigación	31
3.3. Materiales y equipos	31
3.4. Procedimientos	33

3.4.1. Toma de muestras de la cachaza e inóculo	34
3.4.2. Caracterización fisicoquímica de la cachaza e inóculo	35
3.4.3. Descripción de los ensayos de PBM a diferentes diluciones.....	36
3.4.4. Determinación de la producción teórica de metano (PBMt).	39
3.4.5. Determinación de la cinética de producción de metano para la cachaza.....	40
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	41
4.1. Caracterización del inóculo y sustrato	41
4.1.1. Caracterización del inóculo	41
4.1.2. Caracterización del sustrato	42
4.2. Efecto de la dilución en la producción de metano	43
4.3. Potencial Teórico de Metano (PBMt).....	48
4.4. Análisis cinético.....	50
4.5. Evaluación de la estabilidad del proceso	52
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
5.1. Conclusión	58
5.2. Recomendaciones	58
REFERENCIAS	60
ANEXOS.....	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de medición.	35
Tabla 2. Condiciones de operación para las pruebas de PBM de la cachaza.	37
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del inóculo.	41
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica y composición elemental de la cachaza.	42
Tabla 5. Análisis de Varianza entre las diluciones de 6.25 y 12.5%.....	46
Tabla 6. Análisis de varianza entre las diluciones de 12.5, 25, 75 y 100%.....	47
Tabla 7. Prueba de Tukey.	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de la panela	26
Figura 2. Etapas experimentales para el proceso de DA de la Cachaza a diferentes diluciones.....	33
Figura 3. Laboratorio de biotecnología de la UIS.	34
Figura 4. Mapa de ubicación de la toma de muestras de la cachaza e inóculo.....	35
Figura 5. Representación de las unidades de experimentación.	37
Figura 6. Sistema de medición de metano por desplazamiento alcalino	38
Figura 7. Variación de la producción acumulada de CH ₄ en función del tiempo a diferentes diluciones.....	44
Figura 8. Incremento o efecto de las diluciones respecto al control. El control es la dilución de 100% tomado como base cuyo porcentaje de incremento seria 0.	45
Figura 9. Producción diaria de metano de las diferentes diluciones.	48
Figura 10. Potencial teórico de metano respecto al PBM de las diferentes diluciones.	49
Figura 11. Producción acumulada de metano de las diluciones (las líneas corresponden al modelo cinético de primer orden).....	50
Figura 12. Constante global de hidrolisis (k) de las diferentes diluciones.....	51
Figura 13. Relación AGV/AT para la DA de la cachaza a diferentes diluciones, al inicio y al final de las pruebas.	53
Figura 14. Variación de AGV para la DA de la cachaza a diferentes diluciones, al inicio y al final de las pruebas.	54
Figura 15. Variación de pH para la DA de la cachaza a diferentes diluciones, al inicio y al final de las pruebas.	56

INDICE DE ANEXOS

Anexo A. Determinación de la concentración de AGV y AT	71
Anexo B. Determinación de ST y SV	72
Anexo C. Método de desplazamiento alcalino.	73
Anexo D. Registro Fotográfico.	75

Símbolos usados

AGV:	Ácidos Grasos Volátiles (mg/L)
AT:	Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)
CH ₄ :	Metano
CO ₂ :	Dióxido de carbono
DA:	Digestión Anaerobia
DQO:	Demanda Química de Oxígeno
PBM:	Potencial Bioquímico de Metano
RIS:	Relación Inóculo – Sustrato
ST:	Sólidos totales
SV:	Sólidos Volátiles

RESUMEN

La cachaza es uno de los residuos más representativos del proceso de producción de la panela, su inadecuada disposición genera problemas de contaminación en el agua y suelo; por tanto, es importante buscar e implementar alternativas para su aprovechamiento. El objetivo de la presente investigación es evaluar la influencia de la dilución sobre la digestión anaerobia de la cachaza generado en el sector panelero colombiano mediante pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM). La metodología utilizada para determinar el PBM de la cachaza fue por volumetría; las pruebas PBM fueron desarrollados a diluciones de 6.25, 12.5, 25, 75 y 100% (cachaza sin diluir), a temperatura de $37\pm 2^{\circ}\text{C}$ y a una relación inóculo – sustrato (RIS) de $1.5 \text{ gSV}_{\text{inoculo}}/\text{gSV}_{\text{sustrato}}$, además se monitorearon las variables de pH, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y Alcalinidad Total (AT). Los resultados obtenidos revelaron que el potencial de metano incrementa mientras más diluido esta la cachaza, llegando a producir $0.227 \text{ Nm}^3\text{-CH}_4/\text{kgSV}$ a la dilución de 12.5%. Así mismo, los resultados mostraron que la dilución ayuda a que el proceso sea más estable y eficiente, logrando una eficiencia de 56.19% respecto al potencial teórico de metano que es $0.404 \text{ Nm}^3\text{-CH}_4/\text{kg SV}$. También se evidenció que el modelo cinético de primer orden describe satisfactoriamente los datos obtenidos experimentalmente de todas las diluciones. En conclusión, la dilución es requerida para mejorar la producción de metano cuando el sustrato es viscoso o el contenido de solidos es elevado, como ocurre con la cachaza.

Palabras clave: Cachaza, digestión anaerobia, potencial bioquímico de metano, biodegradabilidad.

ABSTRACT

The cachaza is one of the most representative residues of panela production process, its inadequate disposition generates pollution problems in water and soil; therefore, it is important to seek and implement alternatives for its use. The objective of the present investigation is to evaluate the influence of the dilution on the anaerobic digestion of the cachaza generated in the Colombian panelero sector through tests of the Biochemical Methane Potential (BMP). The methodology to determine the BMP of the cachaza was by volumetry; The BMP tests were developed at dilutions of 6.25, 12.5, 25, 75 and 100% (undiluted cachaza), at a temperature of 37 ± 2 ° C and to an inoculum – substrate ratio (IRS) of $1.5 \text{ gSV}_{\text{inoculo}}/\text{gSV}_{\text{substrato}}$, in addition the pH, Volatile Fatty Acids (VFA) and Total Alkalinity (AT) variables were monitored. The results obtained revealed that the methane potential increased while the cachaza is more diluted, reaching $0.227 \text{ Nm}^3\text{-CH}_4/\text{kgSV}$ at the 12.5% dilution. Likewise, the results that the dilution helps the process to be more stable and efficient, achieving an efficiency of 56.19% with respect to the methane potential which is $0.404 \text{ Nm}^3\text{-CH}_4/\text{kgSV}$. It has also been shown that the first order kinetic model satisfactorily describes the experimental data of all dilutions. In conclusion, the dilution is required to improve methane production when the substrate is viscous or the solids content is high, as is the case with the filter cake.

Keywords: Cachaza, Anaerobic Digestion, Biochemical Methane Potential, Biodegradability

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

Hoy en día, la gran demanda energética de todo el mundo está basado principalmente en el uso de combustibles fósiles (Hillon et al., 2018) como el petróleo, carbón y gas natural (Clark, Luque & Matharu, 2012), estos combustibles están causando la generación de graves problemas ambientales (Kibria, Akhundjanov & Olad, 2018) debido a la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono y el metano (Powell, Chertow & Esty, 2018; Manna et al., 2018). Frente a esto, surge la necesidad de explorar nuevas alternativas energéticas que sean autosustentables y ambientalmente amigables, que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles (Hagos *et al.*, 2017; Sukhesh & Rao, 2018; REN21, 2017) y ayuden a mitigar los efectos del cambio climático (Wang, Liang, Zhang, Wang & Wei, 2014).

Existen una gran variedad de alternativas, entre la que más destaca la bioenergía, especialmente la digestión anaerobia (DA), que es la obtención de biogás a partir de residuos biodegradables (Pages, 2010), pues es una de las mejores opciones hablando en términos tecnológicos, ambientales y económicos (Gonzales & Gonzales, 2015) para la gestión adecuada de los residuos orgánicos, el desarrollo sostenible de una región y la mejora de calidad de vida de las personas (Hagos et al., 2017; Siddique, 2018).

En este sentido, la DA ofrece una gran alternativa energética renovable, teniendo en cuenta la gran cantidad de residuos que se generan en la agroindustria panelera de Colombia, ya que este país es considerado el segundo productor mundial de panela y el primer consumidor que transforma 1.3 millones de toneladas de caña de azúcar a panela (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2016), solo superado por la India que transforma 108 millones de toneladas de caña de azúcar a panela anualmente (Nath, Dutta, Kumar & Sighn, 2015). De modo que, la agroindustria panelera es uno de los sectores de mayor importancia en la economía de Colombia, teniendo una participación significativa en el Producto Bruto Interno del sector agrícola de 7.3%, solo superado por la producción de café (Osorio, 2007).

A pesar de esto, es muy importante resaltar que la producción de panela presenta un bajo grado de tecnificación, el cual se ve agravado por la ineficiencia de sus procesos, principalmente en la extracción de los jugos o molienda, la clarificación, la generación térmica para los procesos de evaporación y concentración con las consecuentes pérdidas y desventajas energéticas (muchas veces, para suplir la demanda de energía en forma de calor se utiliza además del bagazo, leña y llantas de desecho los cuales generan grandes cantidades de gases de efecto invernadero como CO₂, CO, SO₂, etc.). Todos estos factores, en adición a las malas prácticas de manejo y aprovechamiento de los residuos generados en los procesos productivos, se traducen en el no aprovechamiento de los recursos naturales, pérdidas energéticas e impactos negativos sobre el aire, agua y suelo. (Useda & Guzman, 2015)

De 9.909.080 toneladas (100%) de caña de azúcar destinadas a la producción de panela, se generan aproximadamente 2.140.361,28 toneladas de hojas verdes, hojas secas y cogollo (21,6%), 3.107.487,5 toneladas de bagazo (31,36%), 311.145,112 toneladas de cachaza (3,14%) y 3.359.172,12 toneladas de vapor de agua (33,9%); se puede ver que solo 990.908

toneladas (10%) representa el producto final que es la panela. Nótese que el residuo que se produce en mayor cantidad es el bagazo, sin embargo, este residuo es reutilizado casi en su totalidad con el propósito de obtener calor por combustión para la evaporación de los jugos de la caña de azúcar en el proceso de producción de panela (Useda & Guzman, 2015), donde resulta que el uso de este residuo con otros propósitos es limitado, para alimentación animal o para elaborar un subproducto llamado “melote” (Osorio, 2007).

Por consiguiente, la cachaza (que es producido en la etapa de clarificación del proceso productivo de la panela) es un residuo bastante atractivo con potencial de utilización energética, puesto que este residuo es desperdiciado o no tiene un uso adecuado y su desaprovechamiento resultaría en un derroche de energía.

En este contexto surge la idea de aprovechar la cachaza mediante la DA, debido a que es una tecnología ampliamente utilizada para producir biogás a partir de diferentes productos biomásicos y residuos con alto contenido orgánico (Nayal & Mammadov, 2016); es más, el biogás podría ser utilizado como energía en los procesos paneleros y el digestato como fertilizante en los campos de caña de azúcar. Para aprovechar la cachaza en la DA, es necesario cuantificar el potencial de producción de metano mediante pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM).

Estas pruebas de PBM son un indicador utilizado para ver la viabilidad del proceso de DA, así como también para evaluar el diseño del digestor basado en parámetros operacionales como la producción de metano (B_0) y la constante de hidrólisis (k) (Astals et al., 2013). Sin embargo, ensayos previos realizados a la cachaza mostraron que este residuo presenta limitantes que impiden que se lleve a cabo adecuadamente la DA, uno de estos limitantes y el más importante es que la cachaza es un residuo acidificable, y esto puede afectar negativamente el proceso de DA e incluso puede llegar a inhibirlo, ya que el pH es

uno de los parámetros más importantes y que en efecto, el proceso de DA, en especial la etapa metanogénica, es muy sensible a fluctuaciones de pH que están muy alejados de la neutralidad (Novais et al., 2018); para solucionar esto, una de las mejores alternativas es realizar la dilución de la cachaza.

Los procesos bioquímicos y fisicoquímicos que ocurren en la DA son influenciados por varios factores, razón por la cual es recomendable desarrollar y aplicar modelos cinéticos, el modelo cinético más utilizado en pruebas batch es el modelo cinético de primer orden (Parra-Orobio; Donoso-Bravo & Torres-Lozada, 2017)

De acuerdo con lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación es “evaluar la influencia de la dilución sobre la DA de la cachaza generada en el sector panelero colombiano mediante pruebas de PBM”. Además, los resultados podrían facilitar el desarrollo de la producción de biogás mediante la cachaza en diferentes regiones de Colombia y demás países de Latinoamérica.

1.2. Justificación

La agroindustria de la panela es muy amplia, su producción genera una gran cantidad de residuos que deben ser gestionados y aprovechados. Los residuos generados en la agroindustria panelera son en su gran mayoría orgánicos, este es el caso de la cachaza que anualmente se generan en Colombia 311.145,112 toneladas, este residuo no tiene un valor económico para los productores, además es un contaminante ambiental.

Por consiguiente, la DA es una alternativa muy prometedora para manejar la cachaza puesto que contiene un elevado contenido de sólidos (sólidos en suspensión, sustancias coloidales y algunos compuestos colorantes naturales) y materia orgánica (García et al., 2007). Es más, al desaprovechar o no darle un uso a la cachaza, se está perdiendo un recurso valioso con potencial de ser utilizado en los propios procesos de producción de panela, esta

reutilización puede ser en forma de energía o fertilizante. Con la utilización de la cachaza mediante la DA se pueden ver beneficiados aproximadamente 20000 trapiches paneleros en todo Colombia.

Sin embargo, para aprovechar este tipo de materia prima mediante la DA con potencial de producir energía y fertilizante orgánico, es necesario cuantificar el potencial de producción de metano. Para esto se desarrollan las pruebas de PBM. Otro aspecto importante para mencionar es que la cachaza tiende a acidificarse, esto fue comprobado por pruebas que se realizaron a la cachaza en los laboratorios de biotecnología de la UIS, y para evitar este problema es necesario diluirlo.

Un punto muy importante para mencionar es que no existe en la literatura trabajos o investigaciones que se hayan realizado en DA o PBM para la cachaza, así que esta es la primera investigación sobre PBM realizado a la cachaza de la agroindustria panelera. La presente investigación ayudara a comprender mejor el comportamiento de la cachaza para que pueda ser utilizado mediante la DA.

1.3. Presuposición filosófica

La tierra le pertenece a Dios (Lev. 25:30) los seres humanos somos simplemente sus cuidadores (Gen. 2:15), por tanto, nunca debemos olvidarnos quien es el verdadero dueño de esta tierra y que tenemos la gran responsabilidad de cuidar el maravilloso regalo que Dios nos dio, de proteger el medio ambiente y su delicado equilibrio.

Sin embargo, a pesar de que Dios nos confió el cuidado de su creación (Gen. 1:28, 2:25), los seres humanos nos empeñamos en destruir la tierra, esto se evidencia en el cambio climático, la contaminación ambiental, las sequías, inundaciones, deforestación, pérdida de la biodiversidad, etc. Es más, en Jeremías 2:7 podemos encontrar todo lo que está pasando, “Y os introduje en tierra de abundancia, para que comieseis su fruto y su bien, pero entrasteis

y contaminasteis mi tierra, e hicisteis abominable mi heredad”. En este sentido, todo el daño que le hacemos a la tierra tiene consecuencias muy graves y fatales.

Muchos se preguntan, “si al final Dios llevará a cabo una nueva creación y hará todo nuevo (Apocalipsis 21:1 – 22:5) ¿Por qué debería preocuparme por cuidar la tierra, el medio ambiente y todo lo que hay en él?”, la biblia es muy clara sobre este tema, en Apocalipsis 11:8 encontramos la respuesta “Y se airaron las naciones, y tu ira ha venido, y el tiempo de juzgar a los muertos, y de dar el galardón a tu siervos los profetas, a los santos, y a los que tienen tu nombre, a los pequeños y a los grandes, y de destruir a los que destruyen la tierra”. En consecuencia, la mejor manera de honrar al Creador es cuidar y proteger su creación.

Por lo mencionado, es necesario desarrollar proyectos e investigaciones para cuidar y mejorar nuestro hogar que es la tierra. Uno de los métodos para contribuir con la tarea de cuidar la creación de Dios es mediante la DA de la Cachaza.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de la dilución sobre la digestión anaerobia de la cachaza generado en el sector panelero colombiano.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el Potencial Bioquímico de Metano de la cachaza utilizando diluciones de 6.25, 12.5, 25, 75 y 100%.
- Determinar la influencia de la dilución en el pH, AGV y relación AGV/AT.
- Estimar la constante de hidrolisis cinética.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Estudios de las pruebas PBM a diferentes diluciones en residuos de cachaza del proceso de producción de panela no han sido reportados en la literatura. Los estudios que se realizaron fueron a la cachaza del proceso de obtención de azúcar, sin embargo, la información es escasa. Un estudio realizado por Hernández (2000) sobre el comportamiento de la generación de biogás a partir de la cachaza (del proceso de obtención de azúcar) a distintos niveles de sólidos: 4, 6, 8 y 10%, obtuvieron rendimientos de metano similares para todas las concentraciones de sólidos.

Park et al. (2018) evaluaron el efecto del modo de alimentación y la dilución en la DA de residuos de alimentos, se encontró que a mayor dilución existe mayor producción de metano. Más aun, Wang et al. (2017) mencionan que en sustratos con características viscosas como la cachaza es necesario realizar un mezclado para obtener un mayor rendimiento en las Pruebas de PBM, sin embargo, si el sustrato esta lo bastante diluido ya no es necesario realizar el mezclado, esto debido a que la dilución ayuda a mejorar el rendimiento.

Debido a que existe escasa información en la literatura respecto a experimentos de PBM a diferentes diluciones, la Relación inóculo – sustrato (RIS) (que hay mayor investigación y publicaciones en la literatura) cumple una función similar a la dilución, es decir, ambos ayudan a reducir el contenido de sólidos totales en el sustrato.

Por mencionar algunos trabajos, Parra et al. (2015); Boulanger et al. (2012); Zhou et al. (2011) y Raposo et al. (2006) realizaron pruebas de PBM a diferentes RIS, todos estos

autores llegaron a una conclusión de que a mayor RIS existe mayor producción de metano, no obstante, existe un límite en donde el rendimiento empieza a disminuir.

En cuanto a la cinética, El Achkar, et al. (2017); Prajapati y Singh (2018); Wang, et al. (2015), aplicaron el modelo cinético de primer orden para caracterizar el desarrollo de la DA mediante pruebas PBM, sus observaciones indicaron que el modelo cinético de primer orden describe bastante bien los datos experimentales.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En Colombia, Castro-Molano, Escalante-Hernández, Gómez-Serrato y Jiménez-Piñeros (2016) evaluaron el potencial de biometanización de aguas residuales de una planta de sacrificio bovino a temperaturas de 37°C y 30°C, alcanzando una producción de metano de 0.37 y 0.71 m³CH₄/kg SV respectivamente. Así mismo, Marin-Batista, Castro y Escalante (2015), evaluaron el efecto de la carga orgánica en función de la RIS sobre el PBM de la gallinaza de jaula, se obtuvo el mayor rendimiento de metano (0.58 m³CH₄/kgSV) a RIS de 1.

Por otro lado, se debe agregar que, Castro, et al. (2017), evaluaron el comportamiento en condiciones reales de la DA en un digestor tubular de bajo costo. Los datos que obtuvieron indicaron que la digestión era estable con una producción de biogás promedio de 0.85 Nm³/d y el digestato contenía una elevada concentración de nutrientes.

Entonces, el presente trabajo vendría a ser la primera investigación de PBM realizado a la cachaza a distintas diluciones (incluso la primera prueba de DA con cachaza)

2.2. Revisión de literatura

2.2.1. La panela

Para la presente investigación, primero es necesario conocer el proceso productivo de la panela en Colombia, adicionalmente se debe identificar los desechos que este produce. Dado que, Colombia es un gran productor de panela a nivel mundial (el segundo mayor productor de panela en el mundo) y que la actividad panelera representa un sector muy importante para el fortalecimiento de la economía de este país y el sustento económico de miles de hogares campesinos.

La panela es un producto natural que es obtenido como resultado de la concentración y cristalización del jugo de la caña de azúcar que es elaborado en establecimientos llamados comúnmente “trapiches”; en todo el país Colombiano existen aproximadamente 20 000 trapiches (Guerrero & Escobar, 2015). La panela es un endulzante natural el cual es producido generalmente en las siguientes presentaciones: sólida (puede ser de forma cuadrada o circular), granulada y pulverizada (Bello, Pineda & Cáceres, 2016).

2.2.2. Etapas del proceso productivo de la panela

García, Albarracín, Toscano, Santana y Insuasty (2007) y Fonseca (2002), describen el proceso de producción de la panela en las siguientes etapas:

- a. *Corte y apronte de la caña.* El corte de la caña se realiza cuando la caña alcanza su punto de madurez, en donde se procede a cortar los tallos de la planta y separarlos de sus demás componentes como las hojas y el cogollo. Seguido de esto se realiza la operación del apronte, en el que se recolecta la caña cortada y se transporta desde el campo hasta el trapiche.
- b. *Extracción de jugos.* También llamado molienda, en esta etapa, la caña pasa por un molino con el objetivo de obtener su jugo, adicionalmente se obtiene un residuo

- sólido denominado “bagazo”. El jugo continúa el proceso hasta convertirse en panela, mientras que el bagazo es almacenado y secado para reutilizarlo como combustible (generación de calor) en los propios procesos de producción de panela.
- c. *Prelimpieza de los jugos.* Consiste en separar y eliminar por medios físicos el material grueso con el que sales el jugo del molino, principalmente partículas de bagazo.
 - d. *Clarificación o limpieza de los jugos.* Conocido también como “descachazado”, tiene lugar en la paila recibidora o descachazadora, y consiste en la eliminación de las cachazas que son sólidos en suspensión, tales como bagacillos, hojas, arenas, tierra, sustancias coloidales y sólidos solubles presentes en el jugo de la caña, este proceso ocurre gracias al calentamiento suministrado por la hornilla y la acción aglutinante de ciertos compuestos naturales como el cadillo, el balso, el guácimo, entre otros. Estos aglutinantes hacen que los sólidos en suspensión se junten entre si y formen una masa homogénea que se conoce como cachaza, la cual flota en la superficie del jugo y permite que se la pueda extraer manualmente.
 - e. *Evaporación y concentración.* Para la evaporación el calor que se suministra es aprovechado para el cambio de fase de líquido a vapor, eliminándose aproximadamente el 90% del agua presente, con esto se aumenta el contenido de sólidos solubles hasta el punto de panela o punto miel, en este punto se alcanza una temperatura que ronda los 120 °C. Luego de esto se llega a la concentración que es la fase final del proceso donde se encuentra en el punto miel, a temperaturas por encima de los 100 °C, se realiza en la paila punteadora o concentradora.
 - f. *Punteo y batido.* En el punteo se logra la mayor concentración de los sólidos. El batido consiste en agitar las mieles, con el propósito de cambiarles la textura y estructura y hacerles perder su capacidad de adherencia. Al incorporarles aire a las

mieles, los cristales de sacarosa crecen, adquieren porosidad y la panela cuando se enfría adquiere su característica de sólido compacto, para posteriormente realizarle el moldeo y enfriamiento.

2.2.3. Subproductos de la panela

La agroindustria de la panela es muy amplia, su producción genera una gran cantidad de residuos que deben ser gestionados y aprovechados, puesto que, aproximadamente solo se atribuye valor comercial a un 24% del peso de materia seca de la caña completa, el restante 76% son desechos agrícolas y de fabricación como cogollo, hojas y pajas, bagazos, melaza y cachaza, cuyas características y eficiente utilización les convierte en productos con un valor comercial que pudiera brindar beneficios económicos (Bello et al., 2016)

En el caso particular de la cachaza, que contiene un elevado contenido de sólidos (sólidos en suspensión, sustancias coloidales y algunos compuestos colorantes naturales) y materia orgánica, (García et al., 2007). Estas características hacen que la DA sea una alternativa muy prometedora para manejar la cachaza.

2.2.4. La digestión anaerobia (DA)

La DA llamada también biometanización, es un proceso biológico que se lleva a cabo en un medio sin presencia de oxígeno molecular (O_2) en el cual la materia orgánica (en este caso la cachaza) se descompone por la acción conjunta de diferentes microorganismos (grupos de arqueas y bacterias) para producir biogás y un digerido fuertemente degradado o estabilizado. Más aun, en este proceso se generan bajas cantidades de lodos, ya que, cerca del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano (CH_4) y solo el 10% de la energía es empleada para el crecimiento bacteriano (del Río, 2014). Entonces la DA es una tecnología viable para el tratamiento de residuos biomásicos debido a su

elevada recuperación de energía en forma de CH₄ y a sus limitados impactos ambientales (Zhen et al., 2017).

El principal producto generado a partir de la DA es el biogás, que está compuesto principalmente por CH₄ (50-70%) y CO₂ (30-50%), cuya composición depende del tipo de material o residuo a tratar como del proceso en sí, también existe la presencia de pequeñas cantidades de otros gases como nitrógeno, hidrógeno, sulfuro de hidrogeno y oxígeno (Nayal, Mammadov & Ciliz, 2016). Debido a su elevado contenido en CH₄ que le confiere a su vez un elevado poder calorífico, el biogás puede ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, como fuente de calor (cocina y alumbrado), uso en calderas, en motores de cogeneración, combustible de vehículos o ser incorporado a la red de gas natural (Acosta & Abreu, 2005; del Rio, 2014).

En la DA intervienen una gran cantidad de microorganismos con metabolitos diferentes que realizan una serie de reacciones bioquímicas (del Rio, 2014). Según el número de microorganismos y el sustrato que estos degradan, la DA se realiza en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Angelidaki et al., 2009).

La primera etapa es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas, donde la materia orgánica (polímeros) es fermentada produciendo compuestos más sencillos (monómeros); la segunda etapa es la acidogénesis, que produce ácidos orgánicos (propiónico, butírico, valérico, etc.), alcoholes, H₂, CO₂ y otros productos intermedios; la tercera etapa es la acetogénesis, caracterizado por la formación de acetatos, H₂ y CO₂; y finalmente, como cuarta etapa esta la metanogénesis, donde microorganismos producen CH₄ a partir de acetato, H₂ y CO₂ a través de dos rutas: autotrófica e hidrogenotrófica (Gonzalez-Sanchez et al., 2015)

En la figura 1 se muestra esquemáticamente las distintas etapas que intervienen en el proceso de la DA y los productos que se generan.

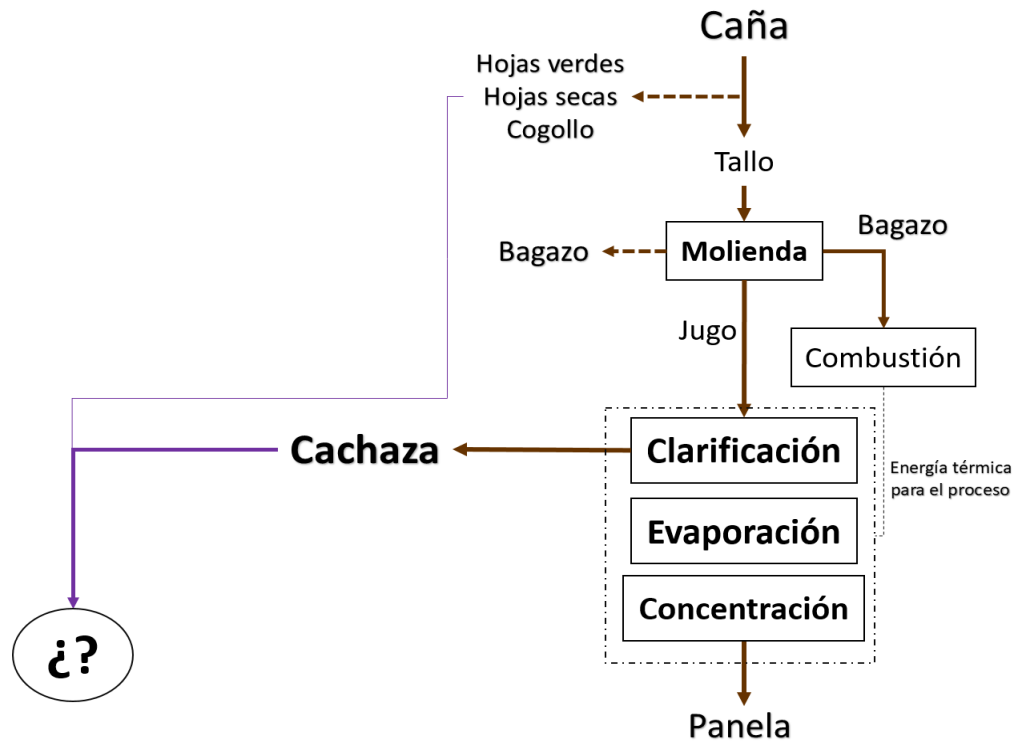


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de la panela

2.2.5. Ensayos de potencial bioquímico de metano (PBM)

El notable crecimiento de la tecnología de DA en todo el mundo en los últimos años ha lanzado la búsqueda intensiva de nuevas fuentes de residuos orgánicos que sirven como sustrato para la DA. En este sentido, para saber si un determinado residuo orgánico o sustrato puede ser utilizado mediante la DA es necesario caracterizarlo mediante las pruebas de PBM, esta prueba permite determinar la biodegradabilidad y el potencial de producción máxima de metano generado con una cantidad conocida de residuos orgánicos (De Vrieze et al., 2015). Asimismo, a través del cálculo del PBM es posible evaluar el desempeño de digestores anaerobios e identificar procesos de inhibición como sobrecarga orgánica, aumento o disminución del pH, exceso de acumulación de AGVs, etc. (Gonzales et al., 2015).

En la práctica, el ensayo de PBM tiene una duración finita, que hay que indicar, se realiza a escala de laboratorio en biorreactores en lote o más conocido como “batch”. Estos ensayos consisten en la mezcla de un sustrato orgánico con un inóculo en condiciones operacionales y experimentales definidas, el metano generado durante la DA se mide mediante un método específico, ya sea mediante el método gravimétrico, manométrico, volumétrico o por cromatografía de gases (Cardenas-Cleves et al., 2016). Se suele expresar como volumen de metano producido en condiciones normales (0°C y 1 atm) por unidad de residuo, en general como no se conoce la composición del residuo se suele expresar en función de los sólidos volátiles (SV) del residuo o de su DQO (Holliger et al., 2016).

Entonces, nos viene una pregunta, ¿para qué me sirve realizar ensayos de PBM? Cardenas-Cleves et al. (2016) mencionan las diferentes aplicaciones que tiene este ensayo:

- Determinar la producción máxima de CH₄ y la biodegradabilidad anaerobia de diferentes residuos de origen orgánico.
- Identificar el potencial de producción de energía de los residuos orgánicos.
- Identificar y desarrollar nuevos indicadores para la evaluación de potenciales sustratos.
- Identificar la adaptación o inhibición de los microorganismos y elegir inóculos adecuados.
- Determinar la cinética de degradación para la calibración de modelos matemáticos y cinéticos que permitan simular el proceso de DA y predecir el funcionamiento de digestores a escala real.
- Evaluar el efecto de la co-digestión de diferentes sustratos.

La DA y específicamente los ensayos de PBM son procesos en los que intervienen diferentes parámetros como la relación inóculo-sustrato (RIS), los sólidos volátiles (SV),

ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad total (AT), temperatura, pH, dilución, además de otros parámetros.

Las pautas para la determinación de las pruebas de PBM en batch han sido propuestas por Algeldaki et al. (2009) así como también por Holliger et al. (2016), incluye la caracterización del sustrato e inóculo, la RIS, los procedimientos experimentales, la interpretación de los datos y el reporte de datos.

2.2.6. Variables del proceso de DA.

Diferentes factores influyen en el proceso de DA, principalmente las características del sustrato y las relacionadas a las condiciones de operación del proceso. Durante la DA se pueden generar inhibidores o compuestos tóxicos que influyen negativamente en el rendimiento de proceso.

A. Relación inóculo-sustrato (RIS)

La RIS es un parámetro operacional muy importante para la optimización del proceso (Fathya, Assia & Hamza, 2014). La RIS se expresa generalmente en términos de los SV del inóculo y del sustrato ($gSV_{inoculo}/gSV_{sustrato}$), un valor adecuado de RIS en el proceso de DA asegura la presencia de los grupos bacterianos necesarios para la biodegradabilidad de la materia orgánica (Cardenas-Cleves et al., 2016).

No existen estudios acerca de la adecuada RIS para la cachaza, sin embargo, en la literatura se muestran valores de RIS óptimos para otro tipo de sustratos de 0.6 y 0.9 (Zhou et al., 2011), 2 (Boulanger et al., 2012). Por otro lado, en pruebas de PBM de residuos de maíz en rangos de RIS de 3, 2, 1.5 y 1 mostraron poca variación y mejor rendimiento a rangos más elevados (Raposo et al., 2006). En general, a valores de RIS más elevados el proceso es estable y a valores más bajos el proceso se desestabiliza por la ocurrencia de

procesos de acidificación, siendo los valores de entre 1.5 (Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 2006) y 2 (Raposo et al., 2006) los más recomendados.

B. Temperatura

La DA se puede llevar a cabo generalmente en tres rangos de temperaturas: psicrófila (<20°C), mesófila (25-45°C) y termófila (>45°C). Las reacciones biológicas se dan a mayor velocidad conforme aumenta la temperatura. La DA mesófila y termófila presentan mejor producción de metano, sin embargo, la DA mesófila es la más comúnmente utilizada (Feng, et al., 2019).

C. pH

El rango de valores de pH para obtener una máxima producción de biogás en la DA es de 6.5 a 8 (Poh & Chong, 2009). Los Valores de pH que están por encima de 9.5 y debajo de 4 puede llevar a desequilibrios en el proceso (Nielsen, Uellendahl & Ahring, 2007)

D. Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Los AGV son muy importantes en el proceso de DA ya que son el precursor de la metanogénesis. Generalmente se considera que la concentración de AGV no debe ser superior a 2000 mg/L. Es muy importante conocer la concentración de AGV, ya que una acumulación excesiva puede provocar que el pH descienda a condiciones ácidas (Acosta & Abreu, 2005)

E. Alcalinidad total (AT)

La AT es la medida de la capacidad del sistema para contrarrestar la presencia de ácidos sin que el pH disminuya (Campos et al., 2011). Esta capacidad tampón o “buffer” puede ser proporcionada por la presencia de iones hidroxilo (OH⁻), bicarbonato (H₂CO₃⁻) y carbonato (CO₃⁼) (Charles et al., 2009). Los valores recomendados según Holliger et al. (2016) deben ser mayores a 3000 mg_{CaCO₃}L⁻¹.

F. Sólidos volátiles (SV)

Los SV representan al contenido de materia orgánica susceptible de ser biodegradado en el residuo, y está definido como la pérdida de una cantidad de materia a temperatura de 550°C después de 1 hora. El método se fundamenta en que la mayoría de los materiales orgánicos se queman a esta temperatura (Angelidaki et al., 2004).

2.2.7. Modelamiento cinético

El estudio del modelo cinético de la DA puede ser una herramienta útil para la predicción del rendimiento del proceso, así como para una mejor comprensión del mismo y sus condiciones de trabajo óptimas (Manjusha & Beevi, 2016). El modelo cinético de primer orden es un modelo simple y útil que es frecuentemente utilizado en los procesos de DA, su ecuación básica es: $dS/dt = -k \cdot S$ (Raposo et al., 2011).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación corresponde al tipo de investigación experimental, se manipulo la variable independiente (diferentes porcentajes de dilución), mediante ensayos de laboratorio denominados “Pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM)” para recolectar datos de la producción de metano en cada dilución.

3.2. Diseño de la investigación

En la presente investigación, el diseño experimental fue el de dilución optima que logre una mayor producción de metano de la cachaza. Para verificar esto, se realizaron pruebas PBM mediante el método volumétrico (desplazamiento alcalino) en botellas de 100 ml, realizándose diluciones de 6.25, 12.5, 25, 75 y 100% con sus respectivos blancos (ver figura 5), cada dilución se realizó por triplicado, esto quiere decir que se montaron un total de 30 botellas.

3.3. Materiales y equipos

3.3.1. Materiales, equipos y reactivos

a. Materiales de laboratorio

- Probetas

- Vasos de precipitado
- Matraz
- Botellas serológicas de 100 ml
- Embudo
- Campana de desecación
- Pizeta
- Crisoles
- Tubos falcon
- Bureta
- Balón
- Refrigerante
- Pipeta milimétrica
- Soporte universal

b. Equipos

- Incubadora
- Estufa
- Mufla
- Agitador magnético
- Potenciómetro.
- Centrifuga
- Balanza analítica
- Baño maría
- GPS

c. Reactivos

- Hidróxido de Sodio (NaOH) 0.1N
- Ácido Clorhídrico (HCl) 0.1N

d. Materiales de campo

- Botellas de 5L
- Guantes
- Bolsas de cierre hermético
- Cámara digital
- Cuaderno de campo

3.4. Procedimientos

La estrategia metodológica desarrollada, se configuró en etapas orientadas a evaluar los rendimientos de producción de metano a partir de cachaza. En la figura 2 se muestra de forma general la estrategia metodológica a desarrollar.



Figura 2. Etapas experimentales para el proceso de DA de la Cachaza a diferentes diluciones

Los ensayos se desarrollaron en los laboratorios de biotecnología ambiental de la Universidad Industrial de Santander (UIS) (ver figura 3), ubicado en la ciudad de

Bucaramanga, departamento de Santander - Colombia, que se encuentra a una altitud de 959 msnm con una temperatura promedio de 23 °C.



Figura 3. Laboratorio de biotecnología de la UIS.

3.4.1. Toma de muestras de la cachaza e inóculo

La cachaza usada como sustrato se recolectó de la unidad productora de panela “La esperanza” que está ubicado en el municipio de Mogotes en coordenadas UTM WGS84 721065.1 O, 712356.5 N a una altitud de 1667 msnm (ver figura 4). Las muestras fueron colectadas en bolsas de plástico con sello hermético y fueron llevadas al laboratorio en donde se les refrigeró y almacenó a 4°C hasta su uso, se hizo la refrigeración con el propósito de evitar la acidificación y cambios en la composición química de la cachaza.

El inóculo utilizado en el proceso es un lodo digerido el cual se recolectó de un biodigestor en funcionamiento de la granja “Marcella” ubicado en el municipio de Girón en coordenadas UTM WGS84 705795.3 O, 776002.3 N a una altitud de 959 msnm (ver figura 4). Se recolectó muestras de inóculo en contenedores de 5L e inmediatamente después fueron llevadas al laboratorio para su almacenamiento a temperatura ambiente por un tiempo máximo de 5 días, es decir, el inóculo debe ser utilizado en las pruebas de PBM antes de 5 días.

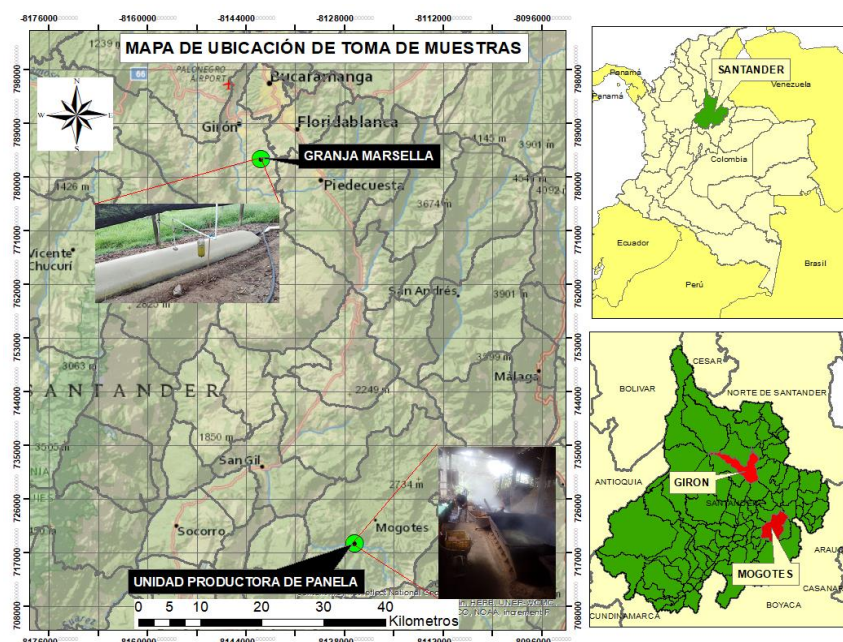


Figura 4. Mapa de ubicación de la toma de muestras de la cachaza e inóculo.

3.4.2. Caracterización fisicoquímica de la cachaza e inóculo

La caracterización fisicoquímica tanto de la cachaza como del inóculo, al inicio y al final, se llevó a cabo de acuerdo con la metodología propuesta por “Standard methods” APHA (2005) en términos de las variables pH, AT, AGV, ST y SV. En la tabla 1 se presenta los parámetros caracterizados, la periodicidad de medición y el método utilizado. Del mismo modo, la cachaza fue sometido a una caracterización en cuanto a análisis elemental (C, H, O, N, S) en el laboratorio Dr. Calderon Labs. Ltda – Colombia.

Tabla 1.
Parámetros de medición

Parámetro	Unidad	Periodicidad	Método empleado
pH	-	Inicio – final	Potenciométrico
Alcalinidad total (AT)	MgCaCO ₃ /L	Inicio – final	Titulación
Ácidos grasos volátiles (AGV)	mg/L	Inicio – final	Titulación
Sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV)	mg/L	Inicio - final	Gravimétrico
Análisis elemental – C, H, O, N, S	g/L y %	Inicio	

Fuente: Elaboración propia

Los datos de las características fisicoquímicas de la cachaza e inóculo fueron procesados empleando métodos estadísticos descriptivos (media, desviación estándar y coeficiente de variación).

3.4.3. Descripción de los ensayos de PBM a diferentes diluciones

A. Configuración experimental y procedimiento

Los ensayos de PBM se llevaron a cabo de acuerdo con el protocolo establecido por Angelidaki et al. (2009) y Holliger et al. (2016). Los experimentos se realizaron por triplicado en reactores batch de 100 mL con 60 mL de volumen de trabajo dejando espacio libre de 40 mL para el almacenamiento de biogás que se produce, a temperatura de $37\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Las mediciones se realizaron cada 24 horas.

Para obtener diferentes valores de dilución, en todas las unidades experimentales se mantuvo fijo la RIS cuyo valor fue de $1.5\text{ gSV}_{\text{inóculo}}/\text{gSV}_{\text{sustrato}}$, también se mantuvo fija la concentración del inóculo (gSV/kg), Lo que vario fue el volumen del inóculo y sustrato y la concentración del sustrato, ya que se le diluyó con agua a diferentes porcentajes (ver figura 5). Cada porcentaje de dilución significa que se le agregó 6.25, 12.5, 25, 75, 100% de cachaza más el porcentaje restante de agua. Cabe resaltar que la dilución de 100% vendría a ser el control, ya que no se le agregó nada de agua, fue cachaza pura con inóculo; entonces, se realizó un control con el fin de comparar los rendimientos para cada dilución.

Para evaluar la producción de metano por actividad endógena del inóculo, se realizaron experimentos denominados blanco, el cual contenía solo inóculo y la cantidad de sustrato fue reemplazado por agua destilada; Entonces, la producción de metano del experimento blanco se restó al PBM de cada ensayo. En la figura 5 se muestra el esquema de las relaciones que se evaluaron, cada unidad experimental contenía su respectivo triplicado.

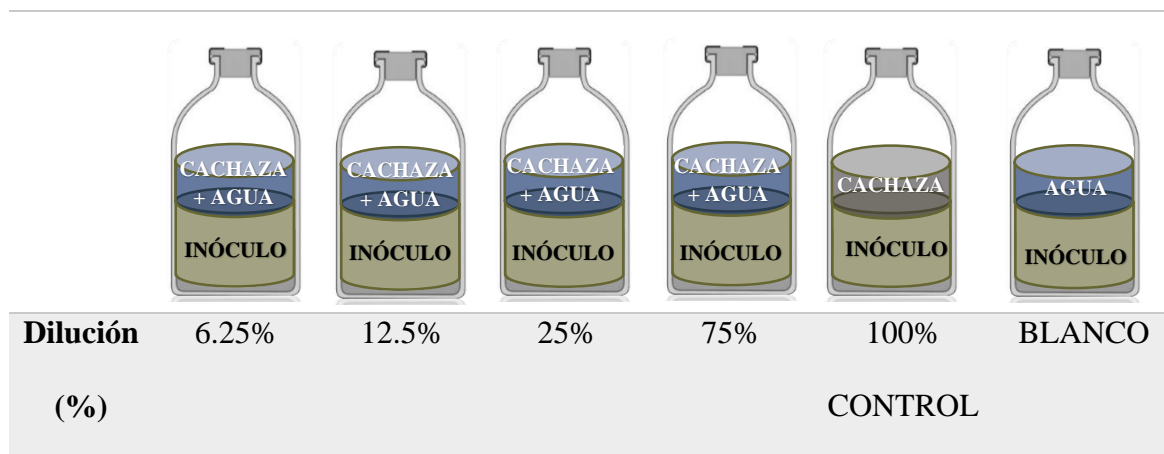


Figura 5. Representación de las unidades de experimentación.

En la tabla 2 se muestran las condiciones de operación con las cuales se trabajó en las pruebas de PBM.

Tabla 2.

Condiciones de operación para las pruebas de PBM de la cachaza.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Volumen del reactor	100	mL
Volumen de operación	60	mL
Temperatura	37 ± 2	°C
RIS	1.5	$\text{gSV}_{\text{inóculo}}/\text{gSV}_{\text{cachaza}}$

Fuente: Elaboración propia.

Todos los ensayos se gasearon con gas nitrógeno durante 30 segundos para garantizar condiciones de anaerobiosis y posteriormente fueron tapados con corchos de butilo y sellados con agafes de aluminio. Los biorreactores fueron agitados manualmente 1 vez al día, antes de su medición.

B. Cuantificación del metano en el biogás en los ensayos PBM

La producción de metano se cuantificó por desplazamiento volumétrico (Raposo, De la Rubia, Fernández-Cegrí & Borja, 2012) utilizando una solución de NaOH 2N a pH 12 como mínimo y fenolftaleína como indicador (ver figura 6). El PBM se expresa en unidades de

volumen de metano a condiciones de presión y temperatura estándar (condiciones normalizadas) por la masa de SV de cachaza adicionados ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}_{\text{sustrato}}$). El volumen de metano se normalizó de acuerdo con la ecuación 1 (Cardenas-Cleves et al., 2016):

$$V_0 = V \frac{(P_L - P_v) * T_0}{P_0 * T} \quad (1)$$

Donde:

V_0 : Volumen de gas en condiciones normales.

V : Volumen de gas generado.

P_L : presión atmosférica en la medición.

P_v : Presión de vapor a la presión y temperatura de medida.

P_0 : Presión de metano en condiciones normales

T_0 : Temperatura del metano en condiciones normales

T : Temperatura ambiental en el momento de la medida.

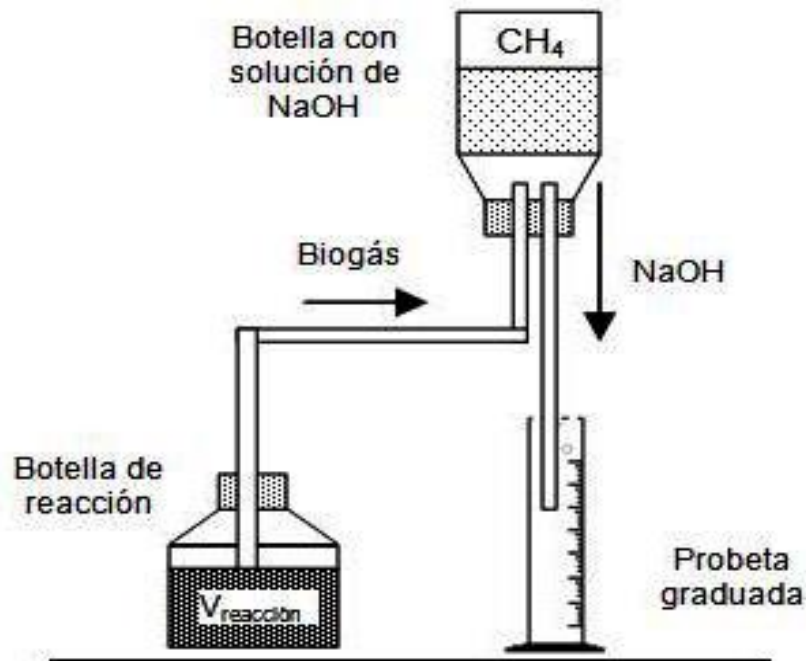


Figura 6. Sistema de medición de metano por desplazamiento alcalino

Para determinar el efecto de la dilución sobre el PBM, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de Tukey con $p < 0.05$, en donde la variable respuesta es el PBM.

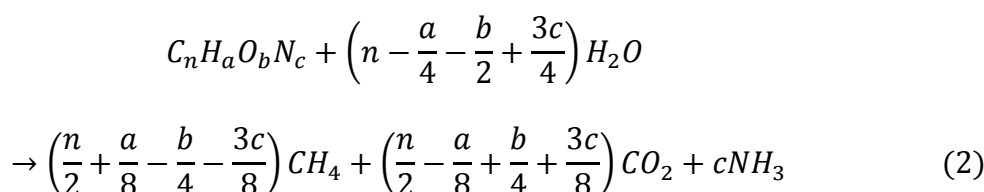
Finalmente, la caracterización fisicoquímica al inicio y al final del proceso ayudo para tener un mayor número de elementos de análisis y comparación de los resultados de los estudios. Por lo mencionado, todas las variables (pH, AGV, ST, SV, AT) se utilizaron como indicadores de la estabilidad del proceso (Torres & Pérez, 2008).

3.4.4. Determinación de la producción teórica de metano (PBMt).

Para determinar el potencial máximo de producción de metano de la cachaza, se calculó la producción teórica de metano utilizando una ecuación en base a la composición atómica de la cachaza.

La ecuación indica la fórmula estequiométrica para la producción de metano. De acuerdo con esta ecuación, la producción de metano puede ser calculada también usando la concentración de proteína, lípidos y carbohidratos.

Entonces, el PBMt puede ser calculado utilizando la formula reportada por Buswell & Mueller (1952) como se muestra en la ecuación 2 y 3, asumiendo la conversión estequiométrica total de la materia orgánica a CH_4 y CO_2 :



$$PBMt = \frac{\left[\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8}\right] * 22400}{(12n + a + 16b + 14c)} \quad (3)$$

3.4.5. Determinación de la cinética de producción de metano para la cachaza

La producción de metano se modela mediante la adaptación de los datos experimentales con el modelo cinético de primer orden de Hashimoto (ecuación 4) usando el programa Statgraphics. Se utilizó este modelo de primer orden puesto que globalmente, el proceso de DA sigue una cinética de primer orden (Borja Padilla, Garrido Fernández & Durán-Barrantes, 1992; Zhen, Lu, Li, & Zhao, 2014). El modelo cinético de primer orden se utiliza para estimar la constante de hidrólisis k (El Achkar et al., 2017).

$$B(t) = B_0 * (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

Dónde: $B(t)$ es la producción de metano acumulado ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$), B_0 es la máxima producción de metano del sustrato ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$), k (días^{-1}) es la constante cinética de desintegración de primer orden o constante global de desintegración y t (días) es el tiempo (Raposo et al., 2011).

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización del inóculo y sustrato

4.1.1. Caracterización del inóculo

Las principales características físicas y químicas del inóculo utilizado en las pruebas de PBM se presentan en la tabla 3.

Tabla 3.
Caracterización fisicoquímica del inóculo.

Parámetro	Unidades	Inóculo
pH	--	7.44
AGV	mg CH ₃ COOH/L	240
Sólidos totales	g ST/kg	26.86
Sólidos Volátiles	g SV/kg	20
Actividad Metanogénica específica (AME)	g DQO/g SV*día	0.0338
AGV/AT	mg CH ₃ COOH/mg CaCO ₃	0.21

Fuente: Elaboración propia

Los valores presentados en la tabla 3 indican que el inóculo es de buena calidad o el inóculo es adecuado para ser utilizado en las pruebas de PBM. Esto debido a que tanto el

pH, AGV, SV, y la relación AGV/AT están dentro de los valores recomendados por la literatura. El valor de pH se recomienda que este entre 7 – 8.5, el AGV tiene que ser menor a 1000 mg CH₃COOH/L, la relación AGV/AT menor que 0.6 mg CH₃COOH/mg CaCO₃ y los SV tienen que ser menores de 100 g SV/kg (Holliger et al., 2016; Castro, et al., 2017; Weinrich, Schäfer, Bochmann & Liebetrau, 2018).

Otro indicador muy importante de la calidad del buen inóculo es la Actividad Metanogénica Específica (AME). La actividad metanogénica en el inóculo es de 0.0338 g DQO/g SV*día, un valor bastante cercano a lo hallado por Castro et al. (2017), el cual sugiere que las *arqueas* contenidas en el inóculo están satisfactoriamente adaptados para llevar a cabo la digestión anaerobia. Todo esto demuestra que el inóculo es ideal.

4.1.2. Caracterización del sustrato

En la tabla 4 se presenta la caracterización fisicoquímica de la Cachaza.

Tabla 4.

Caracterización fisicoquímica y composición elemental de la cachaza.

Parámetro	Unidades	Inoculo
pH	--	6.14
AGV	mg CH ₃ COOH/L	1760
Sólidos totales	g ST/kg	227.97
	%ST	93.94%
Sólidos Volátiles	g SV/kg	214.17
AGV/AT	mg CH ₃ COOH/mg CaCO ₃	1.13
Carbono	g/L	84.8000
	%	38.2602
Hidrógeno	g/L	13.3100
	%	6.0052
Oxígeno	g/L	99.3600
	%	44.8295
Nitrógeno	g/L	1.8600
	%	0.8392
Azufre	g/L	0.1300
	%	0.0587
Cenizas	g/L	12.0100
	%	5.4187

Fuente: elaboración propia

La materia orgánica disponible para la degradación, que se presenta en altas concentraciones de SV y ST, permiten identificar en la cachaza una fuente de carbono atractiva para la DA. La concentración de AGV y pH están cercanos al límite de inhibición, que para el AGV es 2000 mg CH₃COOH/L (Li, et al., 2013) y el pH debe estar en el rango de 6 -8.5 (Chandra, Takeuchi & Hasegawa, 2012), esto hace que la capacidad tampón de la cachaza que está representada por la relación AGV/AT sea baja (Callagan, Wase, Thayanithy & Forster, 2002).

Para amortiguar el efecto inhibitorio causado principalmente por la concentración de AGV, el pH y la baja capacidad tampón, Park et al. (2018) recomiendan que los ST sean menores a 150 g/kg, una de las alternativas para lograr esto es mediante diluciones con agua.

4.2. Efecto de la dilución en la producción de metano

En la figura 7 se muestra la producción acumulada de CH₄ en función del tiempo a diferentes diluciones (6.25, 12.5, 25, 75 y 100%), la producción de CH₄ fue corregido teniendo en cuenta el control de la producción y expresado a condiciones de presión y temperatura estándar, de acuerdo con la ley de gases ideales.

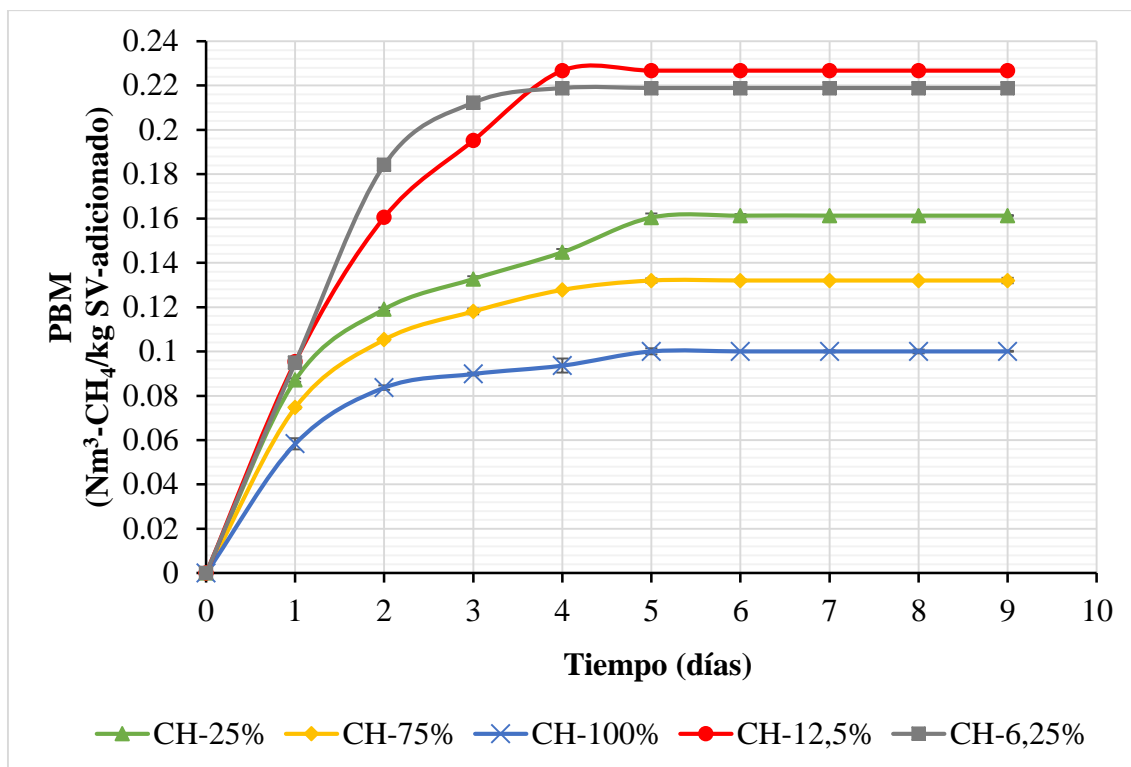


Figura 7. Variación de la producción acumulada de CH₄ en función del tiempo a diferentes diluciones.

Las pruebas de PBM a diferentes diluciones se realizaron por un periodo de 9 días, durante este periodo, el perfil de producción de CH₄ se caracterizó por una fase inicial de crecimiento exponencial del día 0 a 2, una fase posterior de producción más lenta del día 2 a 5 y finalmente una fase de estabilización. La fase inicial corresponde a la producción de CH₄ de componentes que son fácilmente degradados (El Achkar, et al., 2017).

Los valores de CH₄ acumulado después de los 9 días de digestión para las diferentes diluciones fueron: 0.227 Nm³-CH₄/kg SV (dilución = 12.5%), 0.219 Nm³-CH₄/kg SV (dilución = 6.25%), 0.161 Nm³-CH₄/kg SV (dilución = 25%), 0.132 Nm³-CH₄/kg SV (dilución = 75%) y 0.100 Nm³-CH₄/kg SV (dilución = 100%, que es el control). Por lo tanto, se logró llegar a un incremento de hasta el 126.59% a la dilución de 12.5% respecto al control, como se puede apreciar en la figura 8.

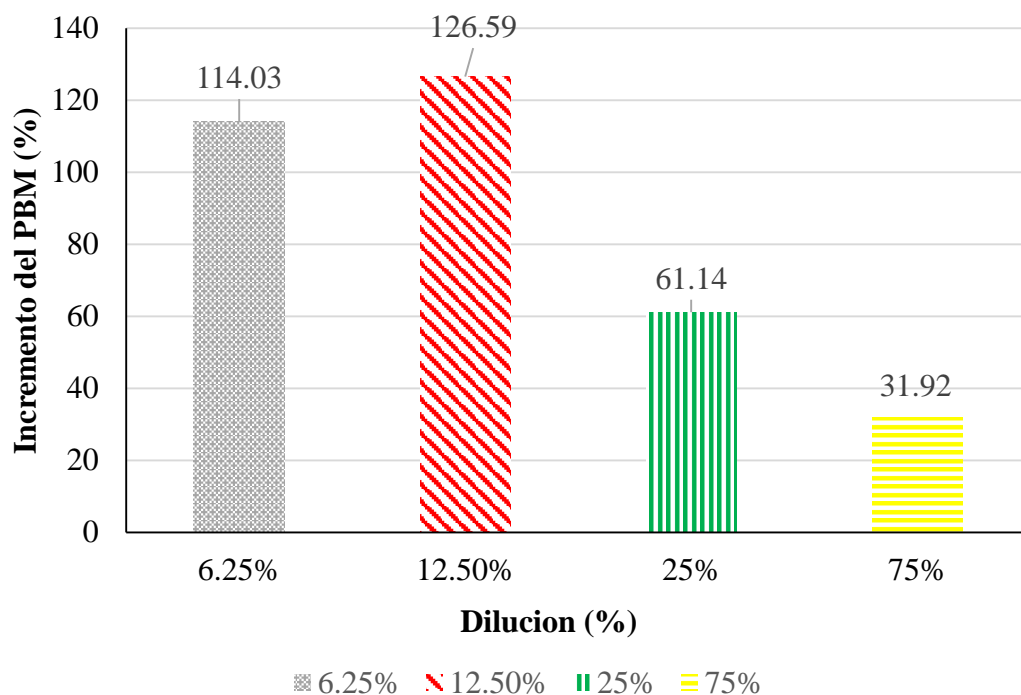


Figura 8. Incremento o efecto de las diluciones respecto al control. El control es la dilución de 100% tomado como base cuyo porcentaje de incremento sería 0.

Las figuras 7 y 8 muestran que la dilución sí tiene efecto sobre la producción de CH₄, es decir, mientras más diluido está la cachaza hay mayor producción de CH₄, estos resultados también coinciden con lo hallado por Maya-Altamira, Baun, Angelidaki & Schmidt, (2008) quienes trabajaron con aguas residuales de una industria de procesamiento de alimentos y observaron que mientras más diluido está el agua residual, la producción de metano incrementa, también Park et al. (2018) mencionan lo mismo.

La dilución de 12.5% es la de mayor producción de CH₄ (0.227 Nm³-CH₄/kg SV) seguida por las diluciones, en orden decreciente, de 6.25, 25, 75 y 100%. Además, se observa que todas las diluciones produjeron mayor cantidad de CH₄ respecto al control. Sin embargo, la dilución tiene un límite, pues la producción de CH₄ a la dilución de 6.25% es menor que a la dilución de 12.5%, esto es debido a que tal como menciona Chandra et al. (2012), con mucha agua el ritmo de producción de biogás por unidad de digerido decrece, por el

contrario, si el contenido de agua en el sustrato es bajo se empiezan a acumular ácidos que provocan la inhibición del proceso de DA.

Un punto muy importante para mencionar es que la cachaza presenta características viscosas, que resulta en contacto insuficiente entre los microorganismos y el sustrato. Entonces, al diluir la cachaza la materia orgánica está más fácilmente disponible para que los microorganismos lo conviertan en CH₄.

Al realizar el análisis estadístico de la producción acumulada de CH₄ se muestra que no existe diferencia significativa entre las diluciones de 12.5 y 6.25% (p-valor = 0.94 > 0.05, ver tabla 5), mientras que si existe diferencia significativa entre las diluciones de 12.5, 25, 75 y 100% (p-valor = 0.02 < 0.05, ver tabla 6). También, la prueba de Tukey al mismo nivel de confianza indica las diferencias entre las diluciones, como se puede apreciar en la tabla 7. Lo anterior indica que las diluciones de 6.25 y 12.5% se encontraron en el mismo grupo. Por lo tanto, la aplicación de una dilución de 12.5% es la mejor opción para aprovechar una mayor cantidad de cachaza con tecnología de DA.

Tabla 5.
Análisis de varianza entre las diluciones de 6.25 y 12.5%.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>Probabilidad</i>
Entre grupos	4.9345E-05	1	4.9345E-05	0.006221492	4.964602744	0.94
Dentro de los grupos	0.079313839	10	0.007931384			
Total	0.079363184	11				

Fuente: elaboración propia

Tabla 6.

Análisis de varianza entre las diluciones de 12.5, 25, 75 y 100%

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>Probabilidad</i>
Entre grupos	0.054	4	0.013	3.410	2.641	0.019
Dentro de los grupos	0.139	35	0.004			
Total	0.192	39				

Fuente: elaboración propia

La prueba de Tukey indica que las comparaciones múltiples para las diluciones reportan tres grupos, el primero formado por las diluciones de 100 y 75%, el segundo grupo formado por las diluciones de 75 y 25% y se reportan los más altos promedios en el tercer grupo de 6.25 y 12.5%; esto indica que estadísticamente no existe diferencia significativa en las diluciones del tercer grupo.

Tabla 7.

Prueba de Tukey

Diluciones (%)	N	Subconjunto		
		1	2	3
100,00	9	0.0917600		
75,00	9	0.1206479	0.1206479	
25,00	9		0.1432211	
6,25	9			0.2004779
12,50	9			0.2012905
Sig.		0.319	0.564	1.000

Fuente: elaboración propia

La producción diaria de CH₄ y sus diluciones en pruebas PBM se muestran en la figura 9. Tendencias similares eran observadas para todas las diluciones. La producción de CH₄ empezó inmediatamente hasta alcanzar el pico de producción el día 1, y luego disminuyó

abruptamente. Después de 6 días de digestión se obtuvieron casi el 100% de los rendimientos experimentales de CH₄.

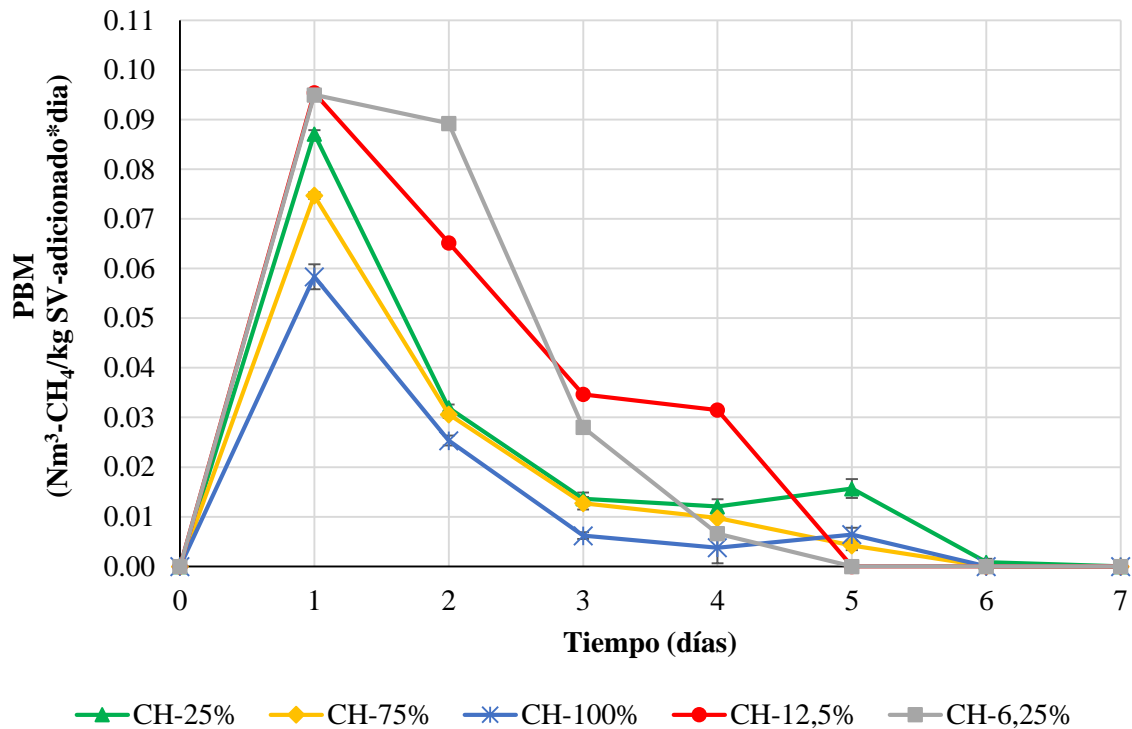


Figura 9. Producción diaria de metano de las diferentes diluciones.

Este comportamiento se debe principalmente a que una gran parte de la cachaza es carbohidrato o azúcar (Hagos et al., 2017). Estos están compuestos por azúcares simples y disacáridos los cuales son fácilmente descompuestos por las Arqueas metanogénicas. Sin embargo, elevados niveles de azúcares simples resultan en una rápida acumulación de AGV, disminución del pH y supresión de las arqueas metanógenas, lo cual provoca que la producción de CH₄ disminuya, tal como se puede apreciar en la figura 8.

4.3. Potencial Teórico de Metano (PBMt)

La producción teórica de metano de la cachaza ha sido calculada utilizando la ecuación (2) y (3). El potencial teórico de CH₄ calculado utilizando la composición elemental de la

cachaza y la biodegradabilidad o PBM calculada experimentalmente de las diferentes diluciones se muestra en la figura 10.

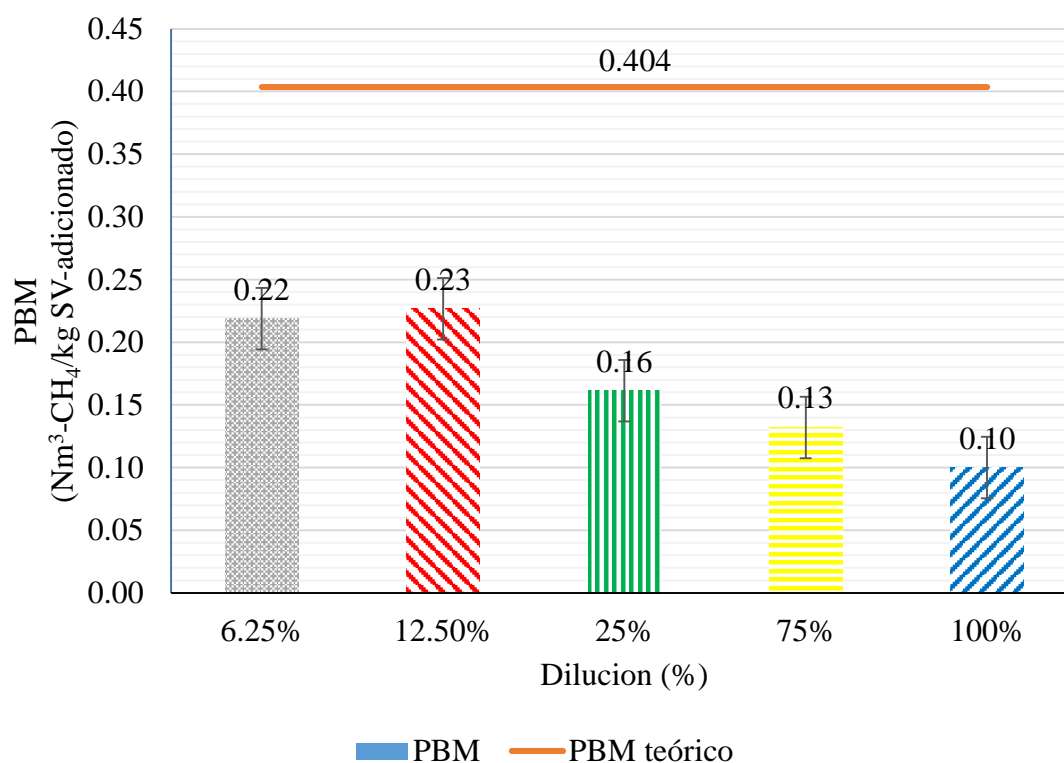


Figura 10. Potencial teórico de metano respecto al PBM de las diferentes diluciones.

La producción teórica de CH₄ obtenida en la presente investigación se encuentra en 0.404 Nm³-CH₄/kg SV. En la figura 10 se puede apreciar la comparación del PBM teórico con el PBM experimental, de acuerdo con este dato se puede ver que la eficiencia del proceso respecto al PBMt es de 56.19% a la dilución de 12.5%.

El PBMt presenta algunas limitaciones, ya que los valores obtenidos mediante este método sobredimensionan los valores de rendimiento, principalmente porque no considera el uso del sustrato en el crecimiento celular ni las restricciones de transferencia de masa y calor que tiene lugar en un biodigestor real (Solarte, Mariscal & Aristizábal, 2017).

4.4. Análisis cinético

En adición de las pruebas de PBM, la evaluación cinética puede proporcionar información útil respecto a la cinética de degradación de un sustrato (Garcia-Gen et al., 2015). Como no hay una fase de retraso al comienzo de las pruebas, se utilizó la ecuación cinética de primer orden para la producción de metano (ecuación 4) para estimar la constante global de hidrólisis o desintegración k (día^{-1}). Los resultados se muestran en la figura 11 y 12.

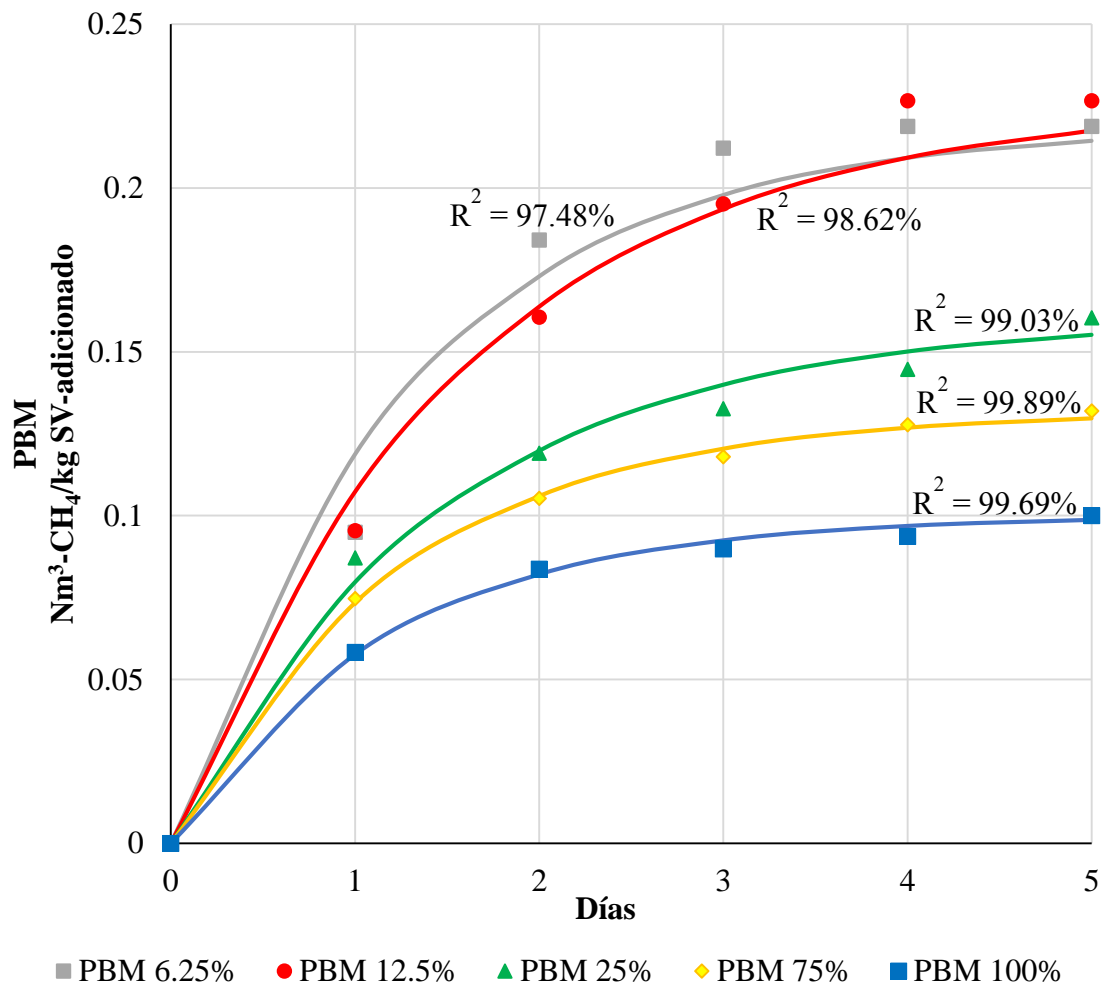


Figura 11. Producción acumulada de metano de las diluciones (las líneas corresponden al modelo cinético de primer orden).

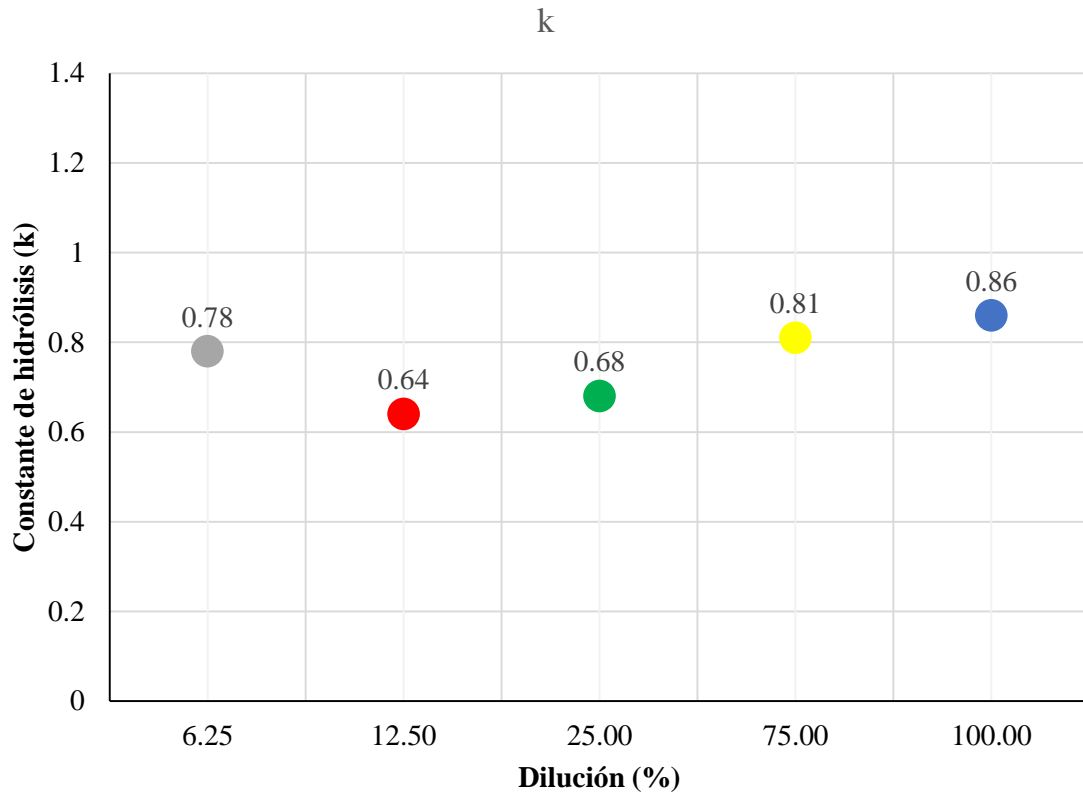


Figura 12. Constante global de hidrolisis (k) de las diferentes diluciones.

El valor más alto de k es 0.86 a la dilución de 100%, seguido por 0.81 para la dilución de 75%, 0.78 para la dilución de 6.25%, 0.68 para la dilución de 25% y el valor más bajo de 0.64 era obtenido para la dilución de 12.5%. Todos estos valores son más altos que los reportados por Raposo et al., (2011), pero están en el mismo rango que los reportados por Garcia-Heras (2003) que trabajó con carbohidratos.

Los valores de k mostraron ser elevadas en todas las diluciones, esto indica que la etapa de hidrólisis es bastante rápida (casi nula) o la degradación de la cachaza ocurre muy rápido, lo cual hace que la cantidad de AGV se eleve y el pH disminuya (como se verá en el siguiente apartado), en consecuencia se inhiba la metanogénesis en los reactores (Li et al., 2013), esta es una de las razones de que las pruebas de PBM duren solo 9 días.

Como se muestra en la figura 11, la producción de CH₄ podría ser bien explicado por el modelo cinético de primer orden, ya que se presentan elevados valores del coeficiente de determinación R² mayores a 0.97 en todos los casos. El valor de 0.97 significa que el modelo podría explicar el 97% la variación total de los datos. El análisis de Kruskal-Wallis revela que no hay diferencia significativa entre los valores experimentales y estimados mediante la ecuación cinética de primer orden; $p > 0.05$ en todos los casos. Estas observaciones indican que el modelo cinético de primer orden describe y ajusta muy bien los datos experimentales (El Achkar et al., 2017).

4.5. Evaluación de la estabilidad del proceso

La baja producción de CH₄ y las fallas en la digestión pueden ser debido a los desequilibrios en las bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y en las arqueas metanogénicas (Brown & Li, 2013); generalmente esos desequilibrios son causados por bajos valores de pH, acumulación de AGV, y valores elevados de la relación AGV/AT (Li et al., 2013b).

En la figura 13 se presenta la relación AGV/AT para la DA de la cachaza a diferentes diluciones, al inicio y al final de las pruebas.

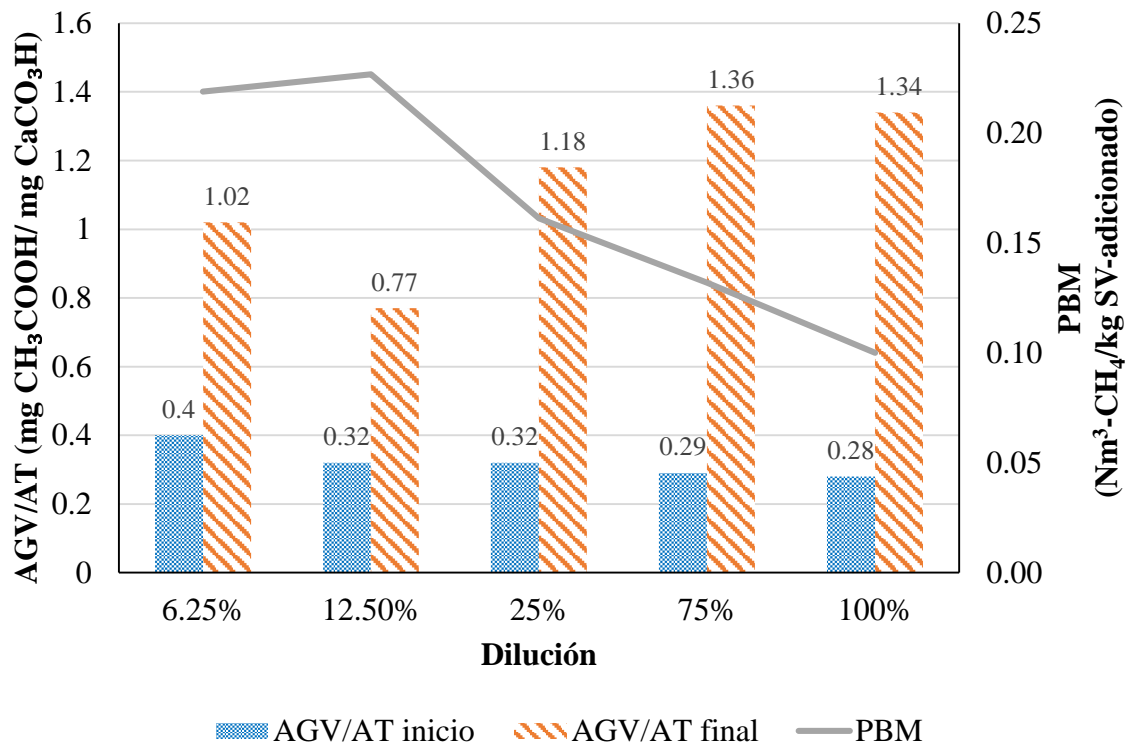


Figura 13. Relación AGV/AT para la DA de la cachaza a diferentes diluciones, al inicio y al final de las pruebas.

El valor de la relación AGV/AT a menudo es utilizada como criterio de estabilidad en la DA (Li et al., 2013); en este sentido, de acuerdo con Callaghan et al. (2002) en la dilución si la relación AGV/AT es menor que 0.4 la digestión debería ser estable, si la relación está en el rango de 0.4 – 0.8 podría ocurrir alguna inestabilidad en el proceso de digestión, si la relación de AGV/AT es superior a 0.8 ocurre una inestabilidad significativa en la digestión. En la figura 13 se puede ver que mientras más diluido esta la cachaza, la relación AGV/AT disminuye, sin embargo, esto ocurre hasta la dilución de 12.5%, si se diluye más, empieza a aumentar la relación AGV/AT. Los valores de la relación AGV/AT para la dilución de 12.5% fueron 0.32 al inicio y 0.77 al final (esta dilución es la más adecuada), para las diluciones de 6.25, 25, 75 y 100% los valores la relación AGV/AT fueron 0.4 al inicio y 1.02 al final, 0.32 al inicio y 1.18 al final, 0.29 al inicio y 1.36 al final, 0.28 al inicio y 1.34 al final respectivamente, mostrando que ocurre inestabilidad en los reactores. Relaciones de

AGV/AT por encima de 0.8 indican que no existe balance entre los microorganismos acidogénicos y metanogénicos (Wan, Zhou, Fu & Li 2011), además, relaciones superiores a 0.8 indican baja capacidad buffer del sistema (Yenigun & Demirel 2013)

La figura 14 muestra la variación de AGV en la DA de la cachaza a diferentes diluciones, tanto al inicio como al final.

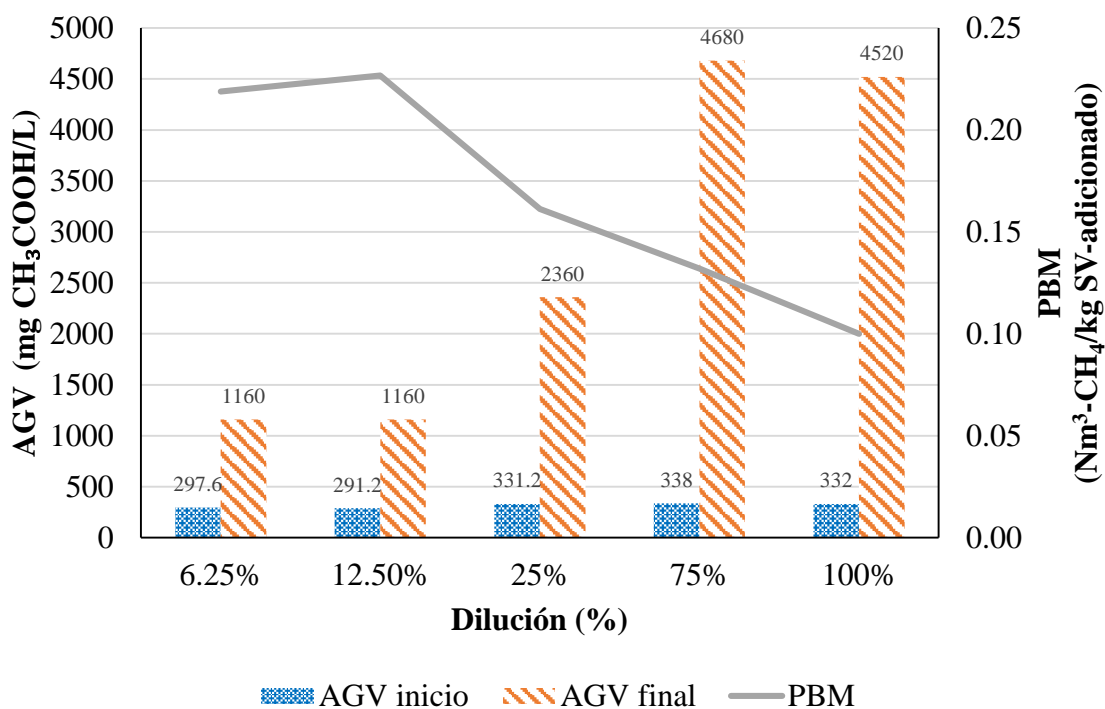


Figura 14. Variación de AGV para la DA de la cachaza a diferentes diluciones, al inicio y al final de las pruebas.

Los AGVs son uno de los parámetros más importantes en el control del proceso anaerobio. Para que el proceso de DA se lleve normalmente, la concentración de AGV debería estar debajo de 2000 mg CH₃ COOH/L, un incremento de AGV indica fallo de la población metanogénica como consecuencia de una sobrecarga orgánica (Li et al., 2013; Sreekrishnan, Kohli & Rana, 2004)

En la figura 14, se muestran los cambios en la concentración de AGV. Al inicio de la prueba se vio que los valores de AGV se encontraban en el rango de 297.6 a 338 mg CH₃ COOH/L. Sin embargo, al final de la prueba los valores de AGV aumentaron enormemente, siendo los más afectados las diluciones de 25, 75 y 100% que llegaron a valores de 2360, 4680 y 4520 mg CH₃ COOH/L respectivamente. La concentración de AGV al final de la prueba de las diluciones de 12.5 y 6.25% estuvieron dentro de lo establecido por la literatura, lo cual se ve reflejado en la elevada producción de CH₄.

Es más, la elevada acumulación de AGV se podría deber a la elevada carga de materia orgánica de la cachaza (Zhou et al., 2018) y que la etapa hidrolítica es más rápida que la de metanogénesis (Córdoba, Fernández & Santalla, 2016), como se pudo apreciar en el apartado de análisis cinético.

Por otra parte, la concentración de AGV producidos durante el proceso de DA afecta al pH (Sreekrishnan, Kohli & Rana, 2004), como se verá a continuación.

La figura 15 muestra la variación de pH en la digestión anaerobia de la cachaza a diferentes diluciones, tanto al inicio como al final.

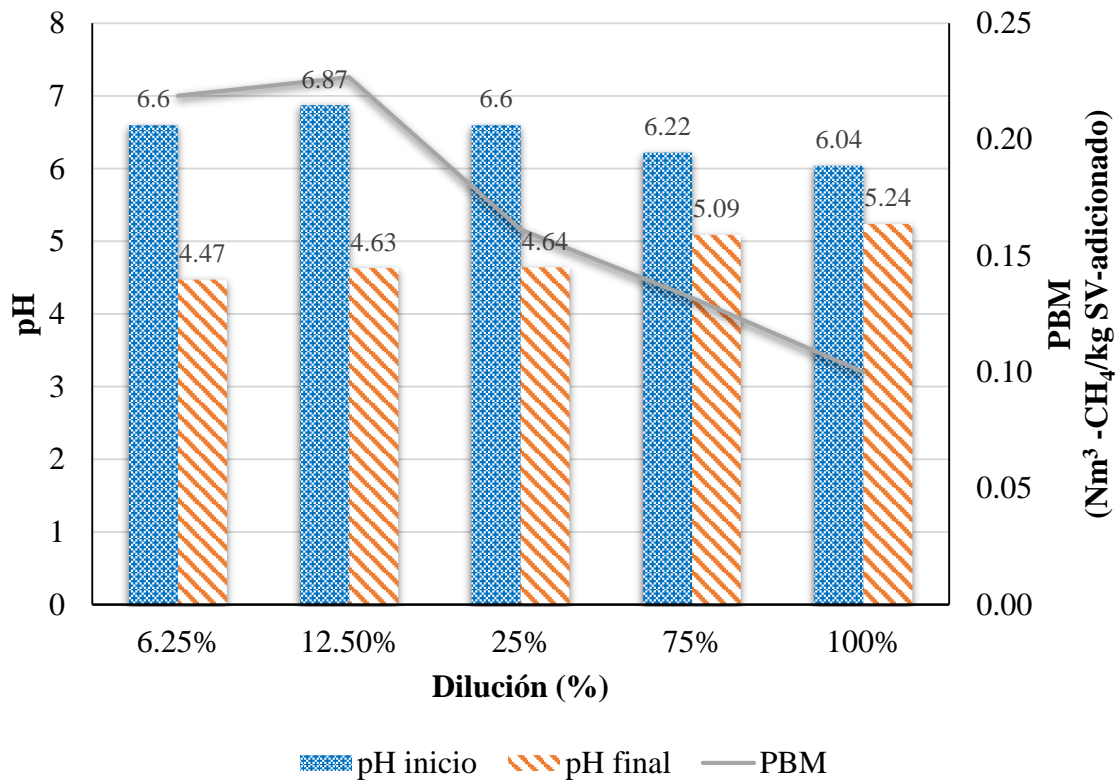


Figura 15. Variación de pH para la DA de la cachaza a diferentes diluciones, al inicio y al final de las pruebas.

En los procesos de PBM, el pH es un parámetro importante que afecta el crecimiento de una variedad de microorganismos involucrados en todo el proceso y afecta significativamente su desarrollo, valores de pH fuera del rango de 6 – 8.5 empiezan mostrando efectos tóxicos en la población metanogénica (Chandra et al., 2012). Así, un adecuado pH es un importante parámetro para la operación de la DA, y el ajuste del pH es una apropiada manera de aumentar la producción de CH₄ (Yang et al., 2015). La dilución ayuda a ajustar o amentar el valor de pH como lo demuestra Wang et al., (2015).

En la figura 15 se puede visualizar que al inicio de las pruebas mientras más diluido esta la cachaza el pH es más alto. Además, todas las diluciones tienen valor de pH encima de 6, sin embargo al final de las pruebas el valor de pH de todas las diluciones bajaron hasta 4.47, 4.63, 4.64, 5.09 y 5.24 para las diluciones de 6.25, 12.5, 25, 75 y 100% respectivamente,

muy por debajo del rango establecido, esto se debe a la baja capacidad buffer del sistema y la elevada acumulación de AGV (Begum et al., 2018; Zhou et al., 2018).

Un punto muy importante a mencionar es que elevados niveles de carbohidratos (comúnmente azúcares simples, como la cachaza) resultan en una rápida acumulación de AGV en el reactor, disminución del pH y supresión de la metanogénesis (Hagos et al., 2017).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusión

Esta investigación demostró que la dilución tuvo un efecto positivo en la producción de CH₄ de la cachaza; este efecto es mayor cuanto más diluido esta la cachaza. Las pruebas PBM mostraron que se logró un incremento de 126.59% y una eficiencia de 56.19% para la dilución de 12.5% produciendo 0.227 Nm³-CH₄/kg SV. Además, las diluciones mejoraron la estabilidad del proceso en cuanto a pH, AGV y relación AGV/AT.

Por otro lado, la cachaza es fácilmente biodegradable vía DA, esto es comprobado por el valor de $k = 0.64 - 0.86$ hallado mediante el modelo cinético de primer orden. A su vez, al utilizar el modelo cinético de primer orden se puede calcular con precisión la DA de la cachaza en batch.

Así que, la cachaza resultó ser un residuo bastante atractivo para ser utilizado por medio de la DA ya que se degrada muy rápido, y parafraseando a Koch, Lippert & Drewes (2017) mientras más rápido la DA, mucho mejor.

5.2. Recomendaciones

Los resultados ofrecen una oportunidad para el aprovechamiento de la cachaza, pero es necesario la búsqueda de modificaciones para aumentar los niveles de eficiencia en la

producción de biogás. Se sugiere investigar con la co-digestion, probar con diferentes inóculos o diferentes RIS.

Por otra parte, para aprovechar aún más los residuos del proceso productivo de la panela, se sugiere utilizar las aguas de lavado para realizar las diluciones.

REFERENCIAS

- Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., ... & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water science and technology*, 59(5), 927-934.
- Astals, S., Esteban-Gutiérrez, M., Fernández-Arévalo, T., Aymerich, E., García-Heras, J.L., Mata-Alvarez, J., (2013). Anaerobic digestion of seven different sewage sludges: A biodegradability and modelling study. *Water Res.* 47, 6033–6043.
- Begum, S., Anupoju, G. R., Sridhar, S., Bhargava, S. K., Jegatheesan, V., & Eshtiaghi, N. (2018). Evaluation of single and two stage anaerobic digestion of landfill leachate: Effect of pH and initial organic loading rate on volatile fatty acid (VFA) and biogas production. *Bioresource technology*, 251, 364-373.
- Bello Pineda, FA, Arcila, C., y Marcela, K. *Alternativa productiva para el aprovechamiento del residuo cachaza* (Tesis doctoral, Universidad del Rosario).
- Borja Padilla, R., Garrido Fernández, A., & Durán-Barrantes, M. D. L. M. (1992). Estudio cinético del proceso de digestión anaerobia de las aguas residuales de la elaboración de aceitunas de mesa negras. *Grasas y Aceites*, 43 (6), 317-321.
- Boulangier, A., Pinet, E., Bouix, M., Bouchez, T., & Mansour, A. A. (2012). Effect of inoculum to substrate ratio (I/S) on municipal solid waste anaerobic degradation kinetics and potential. *Waste management*, 32(12), 2258-2265.

- Brown, D., & Li, Y. (2013). Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource technology*, 127, 275-280.
- Buswell, A. M., & Mueller, H. F. (1952). Mechanism of methane fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(3), 550-552.
- Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., & Forster, C. F. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and bioenergy*, 22(1), 71-77.
- Cárdenas-Cleves, L. M., Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Vásquez-Franco, C. H. (2016). Perspectives of Biochemical Methane Potential-BMP test for control the anaerobic digestion process of wastes. *Revista Ion*, 29(1), 95-108.
- Castro-Molano, L. D. P., Escalante-Hernández, H., Gómez-Serrato, O. J., & Jiménez-Piñeros, D. P. (2016). Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion. *Dyna*, 83(199), 41-49.
- Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource technology*, 239, 311-317.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1462-1476.
- Clark J., Luque R., Matharu A., 2012. Green Chemistry, Biofuels, and Biorefinery, *The Annual Review of Chemical and Biomolecular. Eng.* 3(1) 183-207.

- Córdoba, V., Fernández, M., & Santalla, E. (2016). The effect of different inoculums on anaerobic digestion of swine wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 115-122.
- De Vrieze, J., Raport, L., Willems, B., Verbrugge, S., Volcke, E., Meers, E., ... & Boon, N. (2015). Inoculum selection influences the biochemical methane potential of agro-industrial substrates. *Microbial biotechnology*, 8(5), 776-786.
- del Río, R. S. (2014). *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica II. 2* (Vol. 2). Ediciones Paraninfo, SA.
- (DNP) Departamento Nacional de Planeación (2016). Proyecto tipo para promover la exportación de panela. consultado 2018 setiembre 23. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Proyecto-tipo-para-promover-la-exportaci%C3%B3n-de-panela-anuncia-el-DNP.aspx>.
- El Achkar, J. H., Lendormi, T., Hobaika, Z., Salameh, D., Louka, N., Maroun, R. G., & Lanoisellé, J. L. (2017). Anaerobic digestion of nine varieties of grape pomace: Correlation between biochemical composition and methane production. *Biomass and bioenergy*, 107, 335-344.
- Feng, Q., Song, Y. C., Kim, D.H., Kim, M. S., & Kim D.H. (2019). Influence of the temperature and hydraulic retention time in bioelectrochemical anaerobic digestion of sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(4), 2170-2179.
- Fathya, S., Assia, K., & Hamza, M. (2014). Influence of inoculums/substrate ratios (ISRs) on the mesophilic anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch mode: Process stability and biogas production. *Energy Procedia*, 50, 57-63.
- Fonseca, S. (2002). Guía ambiental para el subsector panelero. FEDEPANELA. Colombia.

- García, H. R., Albarracín, L. C., Toscano LaTorre, A., Santana, N., & Insuasty, O. (2007). Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera.
- García-Heras, J. L. (2003). Reactor sizing, process kinetics and modelling of anaerobic digestion of complex wastes. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, 31-43.
- García-Gen, S., Sousbie, P., Rangaraj, G., Lema, J. M., Rodríguez, J., Steyer, J. P., & Torrijos, M. (2015). Kinetic modelling of anaerobic hydrolysis of solid wastes, including disintegration processes. *Waste management*, 35, 96-104.
- González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., & Yañez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista argentina de microbiología*, 47(3), 229-235.
- Gonzalez, J.R.Q., & Gonzalez, L.E.Q. (2015). perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano. *Gestión y Ambiente*, 18 (1), 179-188.
- Hagos K., Zong J., Li, D., Liu Ch., Lu X, (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. p, 1485-1496
- Hernández, A. F. (2000). Digestion anaerobia de la cachaza a distintas concentraciones de solidos totales. *Tecnología Química*, 20(2), 85-93.
- Hillon, M.L., Moscoviz, R., Trably, E., Leblanc, Y., Bernet, N., Torrijos, M., & Escudie, R. (2018). Co-ensiling as a new technique for long-term storage of agro-industrial waste with low sugar content prior to anaerobic digestion. *Waste Management*, 71, 147-155.

- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., ... & Ebertseder, F. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515-2522.
- IPCC, 2014. Cambio Climatico 2014. Impactos, adaptacion y vulnerabilidad - resumen para responsables de politicas. Contribucion del grupo de trabajo II al Quinto informe de evaluacion del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climatico [Field C., Barros V., Dokken D., Mach K., Mastrandea M., Bilir T., Chatterjee M, Ebi K., Estrada Y., Genova R., Girma B., Kissel E., Levy A., MacCracken S., Mastrandea P., White L.] Organizacion meteorologica mundial. Ginebra, Suiza. 34 pags.
- Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., Liebetrau, J., Nelles, M., & Stinner, W. (2015). Biogas production from sugarcane waste: assessment on kinetic challenges for process designing. *International journal of molecular sciences*, 16(9), 20685-20703.
- Kibria A., Akhundjanov S., y Oladi R, (2018). Fossil fuel Share in the Energy mix and economic Growth. *International Review of Economics and Finance*.
- Koch, K., Lippert, T., & Drewes, J. E. (2017). The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in biochemical methane potential (BMP) tests. *Bioresource technology*, 243, 457-463.
- Li, Y., Zhang, R., Chen, C., Liu, G., He, Y., & Liu, X. (2013). Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. *Bioresource Technology*, 149, 406-412.

- Li, Y., Zhang, R., Liu, X., Chen, C., Xiao, X., Feng, L., ... & Liu, G. (2013b). Evaluating methane production from anaerobic mono-and co-digestion of kitchen waste, corn stover, and chicken manure. *Energy & Fuels*, 27(4), 2085-2091.
- Ma, H., Guo, Y., Qin, Y., & Li, Y. Y. (2018). Nutrient recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion. *Bioresource technology*.
- Manjusha, C., & Beevi, B. S. (2016). Mathematical modeling and simulation of anaerobic digestion of solid waste. *Procedia Technology*, 24, 654-660.
- Manna, M. C., Rahman, M.M., Naidu, R., Sahu, A., Bhattacharjya, S., Wanjari, R.h., Patra, A.K., Chaudari, S.K. & Khanna, S.S. (2018). Bio-Waste Management in Subtropical Soils of India: Future Challenges and Opportunities in Agriculture. *Advances in Agronomy*.
- Marin-Batista, J. D., Castro, L., & Escalante, H. (2015). Efecto de la carga orgánica de la gallinaza de jaula en el potencial de biometanización. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(1), 18-23.
- Maya-Altamira, L., Baun, A., Angelidaki, I., & Schmidt, J. E. (2008). Influence of wastewater characteristics on methane potential in food-processing industry wastewaters. *Water research*, 42(8-9), 2195-2203
- Muhmood, A., Wu, S., Lu, J., Ajmal, Z., Luo, H., & Dong, R. (2018). Nutrient recovery from anaerobically digested chicken slurry via struvite: Performance optimization and interactions with heavy metals and pathogens. *Science of the Total Environment*, 635, 1-9.
- Nath, A., Dutta, D., Kumar, P., & Singh, J. P. (2015). Review on recent advances in value addition of jaggery based products. *Journal of Food Processing & technology*.

- Nayal, F. S., Mammadov, A., Ciliz, N. (2016). Environmental assessment of energy generation from agricultural and farm waste through anaerobic digestion. *Journal of environmental management*, 184, 389-399.
- Nielsen, H. B., Uellendahl, H., & Ahring, B. K. (2007). Regulation and optimization of the biogas process: propionate as a key parameter. *Biomass and bioenergy*, 31(11-12), 820-930.
- Novais, R.M., Gameiro, T. Carvalheiras, J., Seabra, M. P., Tarelho, L. A., Labrincha, J. A., & Capela, I. (2018). High pH buffer capacity biomass fly ash-based geopolymers to boost methane yield in anaerobic digestion. *Journal of cleaner Production*, 178, 258-267.
- Osorio G. (2007). Manual de buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM- en la producción de caña y panela. CORPOICA, MANA y FAO. Colombia.
- Pages, J. (2010). Potencialidad de residuos agroindustriales para producir biogas. Caso de estudio EPG Camilo cienfuegos. Unpublished Maestría, Instituto superior Politecnico Jose Antonio Echevarria.
- Park, J. H., Kumar, G., Yun, Y. M., Kwon, J. C., & Kim, S. H. (2018). Effect of feeding mode and dilution on the performance and microbial community population in anaerobic digestion of food waste. *Bioresource technology*, 248, 134-140.
- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., Torres, W., & Ordoñez, J. (2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(4), 515-526.

- Parra-Orobio, B. A., Donoso-Bravo, A., & Torres-Lozada, P. (2017). Anaerobic digestion of food waste. Predicting of methane production by comparing kinetic models. *Ingeniería y competitividad*, 19(1), 219-227.
- Pastor Alcañiz, L. (2008). *Estudio de la precipitación y recuperación del fósforo presente en las aguas residuales en forma de estruvita (MgNH₄PO₄· 6H₂O)* (Doctoral dissertation).
- Poh, P. E., & Chong, M. F. (2009). Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Bioresource technology*, 100(1), 1-9.
- Powell, J.T., Cherlow, M.R., & Esty, D. C. (2018). Where is global waste management heading? An analysis of solid waste sector commitments from nationally-determined contributions. *Waste Management*, 80, 137-143.
- Prajapati, K. B., & Singh, R. (2018). Kinetic modelling of methane production during bio-electrolysis from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste. *Bioresource technology*, 263, 491-498.
- Raposo, F., Banks, C. J., Siegert, I., Heaven, S., & Borja, R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*, 41(6), 1444-1450.
- Raposo, F., De la Rubia, M. A., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2012). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 861-877.
- Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., De la Rubia, M. A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., ... & Ganesh, R. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic

- substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(8), 1088-1098.
- REN21 Secretariat (2017). *Renewables 2017 Global Status Report*. REN21. Paris, Tech. Rep
- Ribeiro, F. R., Passos, F., Gurgel, L. V. A., Baêta, B. E. L., & de Aquino, S. F. (2017). Anaerobic digestion of hemicellulose hydrolysate produced after hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse in UASB reactor. *Science of the Total Environment*, 584, 1108-1113.
- Romero-Güiza, M. S., Astals, S., Mata-Alvarez, J., & Chimenos, J. M. (2015). Feasibility of coupling anaerobic digestion and struvite precipitation in the same reactor: evaluation of different magnesium sources. *Chemical Engineering Journal*, 270, 542-548.
- Siddique, M.N.I., & Wahid, Z.A. (2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of cleaner Production*, 194, 359-371.
- Solarte Toro, J. C., Mariscal Moreno, J. P., & Aristizábal Zuluaga, B. H. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. *Revista Ion*, 30(1), 105-116.
- Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource technology*, 95(1), 1-10.
- Sukhesh, M.J. & Rao, P.V. (2018). Anaerobic Digestion of Crop Residues: Technological Developments and Environmental Impact in the Indian Context. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*.

- Tao, W., Fattah, K. P., & Huchzermeier, M. P. (2016). Struvite recovery from anaerobically digested dairy manure: a review of application potential and hindrances. *Journal of environmental management*, 169, 46-57.
- Useda, M. E. G., & Guzman, J.D.E (2015). Eficiencia técnica de la producción de panela. *Revista de Tecnología*, 14(1), 107-116.
- Verein Deustcher Ingenieure – VDI, (2006) Fermentation of organic characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests, Alemania.
- Wan, C., Zhou, Q., Fu, G., & Li, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. *Waste management*, 31(8), 1752-1758.
- Wang, B., Liang, X.J., Zhang, H., Wang, L. & Wei, Y.M. (2014). Vulnerability of hydropower generation to climate change in China: Results based on Grey forecasting model. *Energy Policy*, 65, 701-707.
- Wang, B., Björn, A., Strömberg, S., Nges, I. A., Nistor, M., & Liu, J. (2017). Evaluating the influences of mixing strategies on the Biochemical Methane Potential test. *Journal of environmental management*, 185, 54-59.
- Wang, B., Strömberg, S., Li, C., Nges, I. A., Nistor, M., Deng, L., & Liu, J. (2015). Effects of substrate concentration on methane potential and degradation kinetics in batch anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 194, 240-246.
- Yang, L., Huang, Y., Zhao, M., Huang, Z., Miao, H., Xu, Z., & Ruan, W. (2015). Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 105, 153-159.

- Yenigün, O., & Demirel, B. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a review. *Process Biochemistry*, 48(5-6), 901-911.
- Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., & Li, Y. Y. (2017) Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and sustainable Energy Reviews*, 69, 559-577.
- Zhen, G., Lu, X., Li, Y. Y., & Zhao, Y. (2014). Combined electrical-alkali pretreatment to increase the anaerobic hydrolysis rate of waste activated sludge during anaerobic digestion. *Applied energy*, 128, 93-102.
- Zhou, Y., Xu, Z., Zhao, M., Shi, W., Huang, Z., He, D., & Ruan, W. (2018). Construction and evaluation of efficient solid-state anaerobic digestion system via vinegar residue. *International biodeterioration & biodegradation*, 133, 142-150.
- Zhou, Y., Zhang, Z., Nakamoto, T., Li, Y., Yang, Y., Utsumi, M., & Sugiura, N. (2011). Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 3251-3256

ANEXOS

Anexo A. Determinación de la concentración de AGV y AT

Materiales:

- Probeta de 25 mL
- Vaso precipitado de 100 mL.
- Matraz de 100 mL.
- Centrifugadora.
- pH-metro.
- Agitador magnético.
- Plancha de agitación magnética.
- 1 balon esmerilado de fondo redondo o plano.
- Condensador.
- Plancha de calentamiento.
- 2 buretas.
- Soporte de plancha.
- Soporte universal.
- Pinzas.
- Micropipeta
- Solución de NaOH al 0.1N
- Solución de HCl al 0.1N

Procedimiento:

1. Tomar una muestra aproximadamente de 40 mL de tubos falcon de 50 ml.
2. Centrifugar las muestras por 30 minutos a 5000 rpm.

3. Llevar el sobrenadante a frascos plásticos, medir el pH y registrar el valor.
4. Medir 5 ml de sobrenadante y llevarlo a un vaso de precipitado de 100 mL.
5. Medir en una probeta 25 ml de agua destilada y agregarla a los 5 ml de sobrenadante.
6. Titular con una solución previamente preparada de HCl 0.1N hasta alcanzar pH de 3 y registrar volumen (V1), manteniendo agitación continua.
7. Llevar la muestra a un balón esmerilado, adaptarlo al condensador.
8. Calentar hasta ebullición y mantenerlo por 2 minutos.
9. Titular con una solución previamente preparada de NaOH 0.1N hasta alcanzar un pH de 6.5 registrar el volumen (V2).

Cálculos:

$$\text{Alcalinidad} = \frac{V1 * N_{HCl} * 50000}{5} \left[\frac{mg}{L} \right]$$

$$AGV = \frac{V2 * N_{NaOH} * 60000}{5} \left[\frac{mg}{L} \right]$$

Anexo B. Determinación de ST y SV

Materiales:

- Placas de evaporación.
- Mufla para operar a 550 °C
- Horno de secado para operar a 105°C
- Balanza analítica
- Desecador.
- Crisoles

Procedimiento:

1. Pesar un crisol (P1), previamente secado (por lo menos un día antes de su uso)
2. Tomar una muestra en el crisol.
3. Trasladar la muestra al horno de secado por 24 horas. Después de ese tiempo, pesarlas (P2).
4. Incinerar la muestra en la mufla a 550 °C durante una hora.
5. Pesar (P3).

Cálculos:

$$\% \text{ de solidos totales} = (P2 - P1) * \frac{100}{V}$$

$$\% \text{ de solidos volátiles} = (P3 - P1) * \frac{100}{V}$$

Anexo C. Método de desplazamiento alcalino.

Materiales:

- Biodigestor anaerobio.
- Solución 0.1N NaOH
- Fenolftaleína.
- Mangueras y agujas.
- Recipiente colector de 1L.

Procedimiento:

Cada reactor se conecta con la botella de desplazamiento alcalino por medio de una red de mangueras de plástico y agujas como se muestra en la figura 6. El biogás producido en el reactor se burbujea en la solución alcalina como fenolftaleína como indicador y pH mayor que 12, en la cual el CO₂ es absorbido y el volumen de gas metano desplaza un

volumen igual de la solución alcalina. El volumen de la solución desplazada fuera de la botella en el recipiente colector es equivalente al volumen de metano y otros gases en menor proporción generados por el sistema.

Cálculo del volumen de biogás a condiciones normalizadas (VNTP).

Para poder comparar las producciones de biogás y por lo tanto el rendimiento, es necesario llevar el volumen de biogás a condiciones normalizadas.

$$VNTP = v \frac{(P_{atm} - P_v) * T_o}{P_o * T}$$

Donde:

v = Volumen del gas generado

P_{atm} = presión atmosférica

T_o = Temperatura estándar 273.15 (K)

P_o = presión estándar 1013.25 (mbar)

P_v = Presión de vapor de agua.

$$P_v = 10 * e^{\left(16.573 - \frac{3988.842}{T(K) - 3947}\right)}$$

T = temperatura al momento de medir (K)

Anexo D. Registro Fotográfico.



Trapiche panelero



Elaboración de la panela



Cachaza



Recolección de la Cachaza



Montaje de los biorreactores



Incubación de los biorreactores



Medición de metano



Medición de pH, AGV y AT