

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de:

INGENIERA AGROINDUSTRIAL

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA
PARA PREDECIR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA PANELERA EN LA
PROVINCIA DE PASTAZA.**

AUTOR

PICO POMA LEIDY PAOLA

DIRECTORES

PÉREZ MARTÍNEZ AMAURY

DIEGUEZ SANTANA KAREL

PUYO – PASTAZA – ECUADOR

2018

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

RESPONSABILIDAD

Yo Leidy Paola Pico Poma, declaro que el contenido de ésta investigación es de mi auditoría exclusiva.

Leidy Paola Pico Poma

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Leidy Paola Pico Poma egresada de la Carrera de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Estatal Amazónica, bajo mi supervisión.

Dr. Amaury Pérez Martínez

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Karel Diéguez Santana

DIRECTOR DEL PROYECTO

INFORME DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Titulo: “SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA PREDECIR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA PANELERA EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”

Autor (a): LEIDY PAOLA PICO POMA

Unidad de Titulación: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Director del proyecto: AMAURY PEREZ MARTINEZ y KAREL DIEGUEZ SANTANA

Fecha: 08 de Junio del 2018

Introducción y contexto de la investigación:

En el mundo se producen una gran cantidad de residuos sólidos los cuales generan graves problemas por el deterioro progresivo del medio ambiente y desde el punto de vista económico puesto que los costos de recolección, transporte y disposición final son cada vez mayores (Cardona, Sánchez, Ramírez, & Alzate, 2004). Sin embargo, actualmente se ha visto una gran oportunidad para su aprovechamiento como fuente de energía renovable haciendo del tratamiento anaerobio, una tecnología atractiva, poco costosa y cuyo producto (biogás y digestato) tienen un alto valor agregado (López, Jiménez, Romero, & Dewulf, 2012).

Según (Camargo & Williams, 2012; Martínez, Oechsner, Brulé, & Maraño, 2014; Pinos et al., 2012) la producción de biogás se produce como resultado de someter al estiércol, o a cualquier otro deshecho orgánico de la producción agrícola y agroindustrial (residuos lácteos, cárnicos, bagazos, cachaza, vinazas, etc.), a la acción de bacterias anaeróbicas en un proceso llamado biodigestión. En los biodigestores se mezcla el material orgánico con agua a temperaturas adecuadas de entre 20 y 30 grados, donde se origina la reacción que produce el biogás.

El proceso se realiza en cuatro etapas (González, Pérez, Wong, Bello, & Yañez, 2015) de degradación anaeróbica de residuos orgánicos como la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La hidrólisis es donde la materia orgánica se fermenta produciendo compuestos sencillos en monómeros solubles y dímeros. En la acidogénesis las bacterias acidificantes convierten los productos químicos solubles en agua, incluidos los productos de hidrólisis, en ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, aldehídos, dióxido de carbono e hidrógeno.

La fase de acetogénesis es cuando las bacterias acetato, convierten los productos de la fase ácida en acetatos e hidrógeno, aproximadamente el 70% del metano surge en el proceso de reducción de acetatos. La última etapa de metanogénesis el metano se produce a partir de sustratos que son productos de fases anteriores, es decir, ácido acético, H_2 , CO_2 y formiato y metanol, metilamina o sulfuro de dimetilo. Los microorganismos producen metano a través de la ruta acetotrófica e hidrogenotrófica (Ziemiński & Frac, 2012).

La producción de biogás consta de cuatro componentes clave que son materia prima, microorganismos, control del proceso y configuración del reactor o diseño tecnológico (Mel, Hisham, Avicennaa, Ihsanb, & Setyobudic, 2015). Según (Cepero et al., 2012; L. Magaña, Torres, Martínez, Sandoval, & Hernández, 2006; Siefers et al., 2010) dentro de la composición química del biogás tenemos los componentes de CH_4 entre 40 - 70% en volumen, entre el 30 - 60% en volumen de CO_2 , 1-1.5% (H_2), 0.3-3% N_2 y varias impurezas, especialmente H_2S .

La calidad del biogás es mejor cuanto mayor sea el porcentaje de metano, ya que permite usos similares a los del gas natural (contenido de metano en torno al 92%). Para las aplicaciones más simples de biogás tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, la remoción del CO_2 no es necesaria simplemente pasa a través del quemador o motor. En aplicaciones más complejas, tales como vehículos que requieren combustibles de mayor densidad, el CO_2 debe ser removido. La remoción incrementa el poder calorífico y genera un gas de calidad similar a la del gas natural (Varnero, 2011).

En la producción de biogás se utilizan materias primas como desechos sólidos entre los cuales se encuentran el estiércol de animales, desechos agrícolas, domésticos, e industriales (Basanta, Delgado, Martínez, Vázquez, & Vázquez, 2007). Dentro de los industriales se destacan los lácteos, cárnicos, bagazos, cachaza, aceites usados, vinazas, etc. (Martínez et al., 2014).

La cachaza ha sido usada principalmente en el suelo para la agricultura de la caña de azúcar, la alimentación del ganado, extracción de ceras y aceites. Según (Bernal et al., 2017; Ochoa, Cabello, Sagastume, Hens, & Vandecasteele, 2010; Valdés, 2015) proponen la oportunidad de recuperar la cachaza y usarla para la producción de biogás, esta cachaza bajo un tratamiento anaeróbico puede producir alrededor de unos 130 a 155 m³ de biogás por tonelada de cachaza.

La provincia de Pastaza tiene un potencial de producción de caña de azúcar de 4 500 ha, con un rendimiento de 55 T/ha. De la producción de caña de azúcar se destina el 40% para elaboración de panela; de la producción total existe un 10% de desperdicio por causa de falta de vías de comunicación, plagas, enfermedades, etc. (Sablón, Pérez, Acevedo, Chacón, & Villalba, 2016). Se produce caña de azúcar y derivados como panela en ladrillo, panela granulada, aguardiente y caña de fruta, siendo básicamente los únicos productos actualmente elaborados; en condiciones óptimas se producen 840 000 kg de panela/año (ASOCAP, 2017).

En Pastaza se encuentran más de 110 pequeñas fábricas de panela las cuales generan desechos como cachaza, bagazo y aguas residuales que se acumulan en los alrededores de la fábrica, que pueden ser utilizados como biomasa viable para la generación del biocombustible (ASOCAP, 2017; Sánchez, Rivera, & Murrillo, 2010).

Estos residuos que se generan producen contaminación por lo que se busca aprovecharlos por medio de la predicción de la cantidad de biogás que se pudiese obtener de la digestión. A partir de la composición fisicoquímica de los residuos específicamente de la cachaza y el conocimiento fenomenológico se construirá modelos matemáticos del proceso para determinar si el proceso llevado a cabo en el biodigestor va hacer eficiente y optimo (Ramón, Romero, & Simanca, 2013).

La producción de biogás se puede determinar por dos vías fundamentales la experimental con su inherente impacto económico y la estimación a través de la simulación; y los modelos matemáticos. Son varios los ejemplos de aplicación de la simulación en la modelación matemática y en la práctica que impactaron positivamente en el ámbito económico, técnico y ambiental (Diaz, Caballero, & Diaz, 2015; Ribas, Hurtado, Garrido, Domenech, & Sabadí, 2011).

Dentro de los modelos matemáticos se encuentran los fenomenológicos, que buscan predecir el comportamiento observado de la digestión anaeróbica y comprender mejor los fenómenos internos que ocurren en el biodigestor aplicando balances de materia y energía (Fedailaine et al., 2015; Rivera, Aranda, Espinosa, Robles, & Toledo, 2009).

La producción se estima a partir de modelos estequiométricos que permiten reproducir el proceso de degradación de la materia orgánica (Rodrigo, 2016) o de modelos cinéticos que se describen por tres fenómenos, sustrato, crecimiento y descomposición bacteriana; producción de metano e inhibición de la actividad bacteriana obteniendo curvas de tendencia de los parámetros y comparando frente a gráficas similares generadas mediante la implementación de modelos como el *Anaerobic Digestion Model N° 1 ADM-1* (González et al., 2015).

El *ADM-1* es un modelo cinético que permite predecir la cantidad de biogás utilizando los componentes principales, procesos bioquímicos y fisicoquímicos que se dan en el proceso. Según (González et al., 2015; Laines & Sosa, 2013) la producción de biogás también se puede predecir mediante el análisis fisicoquímico, midiendo la demanda química de oxígeno (DQO) total, pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), volumen de biogás y gas metano generado.

Una alternativa para diversificar la industria panelera es la producción de biogás a partir de la cachaza, aplicando modelos matemáticos los cuales buscan predecir el comportamiento observado de la digestión anaeróbica para comprender mejor los fenómenos internos que ocurren en el biodigestor y contribuir a mitigar la contaminación al ambiente de este residuo.

Cumplimiento de objetivos

Los siguientes objetivos planteados en el proyecto de I+D fueron cumplidos. Lo cual permitió caracterizar la producción de biogás a partir de cachaza en función de la composición y el desarrollo de modelos matemáticos (estequiométricos), se evaluó diferentes condiciones de contorno al modelo planteado. Simular el proceso de digestión anaerobia para predecir la producción de biogás a partir de la cachaza determinando la producción y calidad óptima de biogás para un posterior uso.

Principales resultados obtenidos

1) La simulación el proceso de digestión anaerobia estequiométrica se obtuvo para un flujo de 9760 kg/d de cachaza un valor de 1288,62 a 1736,40 m³/d de volumen de biogás con una composición de CH₄ 38,53 - 40,7%, CO₂ 57,2 - 60,23%, H₂S 0,0243 - 0,12% y NH₃ 1,22 - 2,01% del volumen. Para estas características de composición la cantidad de CO₂ se encuentra en mayor porcentaje por el contenido de alcoholes, como uso principal se podría utilizar para red de gas en aplicaciones tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores y uso doméstico ya que para otros usos es necesario realizar un tratamiento posterior.

2) La cachaza es un residuo con un potencial energético para la producción de metano por su contenido orgánico, desde el punto de vista bibliográfico y experimental se determinó su composición para el desarrollo del modelo. La cachaza de Pastaza posee valores bajos ya que durante el proceso de producción de panela no se añade floculante al jugo mezclándose la cachaza con las mieles, la muestra tomada es del sobrenadante el cual no tiene las características adecuadas de la composición del residuo.

3) Se realizó la modelación del proceso de producción de biogás en base a la composición de la cachaza y las reacciones estequiométricas para obtener biogás, CH₄, CO₂, NH₃ y H₂S, y de esta forma predecir qué cantidad se puede obtener.

4) Se definieron 8 condiciones de contorno para la composición y 11 para el flujo de alimentación, obteniéndose que la mayor producción y calidad de biogás está en la composición 6, con una producción de biogás de 1736,40 m³/d para el flujo de alimentación de 9760 kg/d de cachaza, CH₄ un 40,7%, CO₂ un 57,2%, H₂S un 0,12% y NH₃ 2,01% del volumen.

El (la) estudiante LEIDY PAOLA PICO POMA ha mostrado durante el desarrollo de la investigación una elevada dedicación y un alto grado de independencia, sirviendo como guía de los principales elementos a desarrollar en la investigación.

Se destacó la actividad curricular por su rendimiento académico, mostrado durante la investigación interés, motivación en el mismo, lo cual condujo a culminar de forma exitosa el trabajo, cumpliendo con las 400 horas establecidas en el Reglamento de Régimen Académico de la UEA.

La presentación final del trabajo cumple con las normas establecidas en la reglamentación institucional.

La redacción, ortografía, calidad de los gráficos, tablas y anexos es adecuada.

Sin otro particular.

Atentamente,

AMAURY PÉREZ MARTÍNEZ

KAREL DIEGUEZ SANTANA

CI. 175715076-6

CI. 175644412-9

AVAL

Quien suscribe AMAURY PÉREZ MARTÍNEZ y KAREL DIEGUEZ SANTANA, Docente de la Universidad Estatal Amazónica y Universidad Regional Amazónica "IKIAM" respectivamente avalan el Proyecto de investigación:

Título: “SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA PREDECIR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA PANELERA EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”

Autor (a): LEIDY PAOLA PICO POMA

Certifico haber acompañado el proceso de elaboración del Proyecto de Investigación y considero cumple los lineamientos y orientaciones establecidas en la normativa vigente de la institución.

Por lo antes expuesto se avala el Proyecto de investigación para que sea presentado ante la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Agroindustrial como forma de titulación como Ingeniero en Agroindustrias, y que dicha instancia considere el mismo a fin de que tramite lo que corresponda.

Para que a si conste, firmo la presente a los 08 días del mes de Junio del 2018.

Atentamente,

Dr. Amaury Pérez Martínez

Dr. Karel Diéguez Santana



Oficio No. 008-UTIC-UEA-2018
Puyo, 13 de Junio de 2018

Señores
Secretaría Académica U.E.A.
Presente.-

Por medio de presente CERTIFICO que:

El proyecto de titulación, investigación y desarrollo correspondiente a **PICO POMA LEIDY PAOLA**, con C.I. 1600843252 con el Tema: **"SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA PREDECIR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA PANELERA EN LA PROVINCIA DE PASTAZA"**, de la Carrera de Ing. Agroindustrial, Director de proyecto. Dr. Amaury Pérez Martínez. PhD., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 02 %. Informe generado con fecha 12 de junio de 2018 por parte del Director, conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Atentamente,

Ing. Elias Jachero Robalino MSc.

UNIDAD DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN DE LA UEA
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

NOTA: Adjunto Informe generado el 12 de junio de 2018 por parte del Director del proyecto.

Urkund Analysis Result

Analysed Document: PROYECTO I+D LP 12062018.docx (D40133982)
Submitted: 6/12/2018 7:17:00 PM
Submitted By: amperez@uea.edu.ec
Significance: 2 %

Sources included in the report:

trabajo de titulacion.docx (D14887123)
submission.pdf (D35066661)
1A_GALVAN_INGA_TATIANA_RENE_Titulo_Profesional_2018.docx (D40130759)
<http://www.redalyc.org/pdf/2231/223144218011.pdf>

Instances where selected sources appear:

7

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El proyecto de Investigación y Desarrollo titulado “**Simulación del proceso de digestión anaerobia para predecir la producción de biogás a partir de residuos de la industria panelera en la provincia de Pastaza**” fue revisado y aprobado por el siguiente tribunal de sustentación o grado.

MSc. Víctor Cerda Mejía

PRESIDENTE

Dr. Reinier Abreu PhD

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

MSc. Paúl Manobanda

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

2018

AGRADECIMIENTO

Albert Einstein dijo “No fracasas hasta que dejas de intentarlo”

Expreso mi más grato agradecimiento primero a Dios por guiar cada uno de mis pasos durante esta etapa de mi vida.

A mi madre por apoyarme incondicionalmente, ser mi fortaleza cuando más lo necesite brindándome su amor, por compartir cada uno de mis triunfos y fracasos, por ser quien al final del día está conmigo y lucha por sacarnos adelante.

A mi padre que a pesar de nuestras diferencias siempre me apoyo porque para él lo más importante y lo mejor que me podía dar era el estudio.

A mis abuelos por ese amor de padres, por los sabios consejos y el apoyo en cada momento a pesar de la distancia. A mi familia por brindarme su amor incondicional, por escucharme y darme ánimos para seguir cumpliendo todo lo que me propongo.

A ti David, por siempre tener esa palabra de aliento que me impulsaba a seguir adelante, por ser mi apoyo incondicional, mi compañero y el amor de mi vida. A tu familia quien se ha convertido en una parte importante de mi vida, siempre apoyándome cuando más lo eh necesitado.

A mis maestros que me transmitieron sus conocimientos durante todos los años de estudios y me enseñaron a amar esta carrera. A mis tutores por haber depositado su confianza en mí y exigirme más cada día para lograr cumplir esta meta.

A la familia que uno tiene la oportunidad de elegir, mis hermanas de la vida Leslie Medina, Dangela Toqueton y Lisbeth Lara que han sido cómplices de los buenos y malos momentos, que me han apoyado para seguir cumpliendo mis objetivos y que a pesar de la distancia seguimos juntas.

A quienes durante 5 años compartimos la etapa más maravillosa de nuestras vidas y que hasta el último momento seguimos juntas celebrando cada meta cumplida y cada sueño realizado, a ustedes amigas Ángela, Lily, Estefany, Lucero, Mayra, Tania, Jackeline, Marlen y Yuri. Gracias por todo lo bueno y lo malo.

Y a la Universidad Estatal Amazónica, porque aquí me forme como profesional y de donde me llevo los mejores recuerdos.

Gracias a todos ellos....

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y llenarme de bendiciones, por darme la fortaleza para afrontar todos los obstáculos que se me presentaron y ser el pilar fundamental de mi vida.

A la mejor madre del mundo a quien amo con todo mi corazón, quien me dio la vida, a la que lucha por siempre darme todo lo necesario para ser feliz y salir adelante, quien me inculco valores que me formaron como una gran persona y para la cual siempre he sido su prioridad.

A mis abuelos, padre y familia quienes pusieron su confianza en mí brindándome su amor y apoyo incondicional.

A mi amor eterno, David, por ser mi compañero, amigo y novio, quien siempre sabe que decir para sacarme una sonrisa en los peores momentos, quien me hace feliz cada día y sobretodo me impulsa a seguir cumpliendo todo lo que me propongo.

A mis docentes en especial a mis tutores Amaury Pérez y Karel Diéguez, por creer en mí y brindarme sus conocimientos, por exigirme siempre más y ayudarme a lograr esta meta tan anhelada.

Para todos ustedes va dedicado este trabajo.

Leidy

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo de simular el proceso de digestión anaerobia para predecir la producción de biogás a partir de la aplicación de modelos matemáticos y el aprovechamiento de la cachaza generada en las paneleras de la provincia de Pastaza. Se caracterizó de forma experimental la cachaza de Pastaza y se comparó con la literatura obteniendo una composición de humedad 77,07% y 70,72%, proteína 2,04% y 4,39%, lípidos 0,38% y 3,51%, ceniza 1,23% y 2,93%, sacarosa 9,26% y 3,51%, fibra 2,03% y 6,15%, otros 8% y 8,78% respectivamente. Con la composición y las ecuaciones estequiométricas con reacción químicas se desarrolló el modelo matemático estequiométrico para predecir la cantidad de biogás. La simulación se realizó en el software *CHEMCAD 6.3.1* por que posibilita los cálculos de balance de masa en un reactor estequiométrico, se validó el modelo utilizando un flujo de alimentación de 1000 kg/d (1 t/d) y la composición bibliográfica en condiciones ideales obteniéndose 172,98 m³ de biogás por tonelada de cachaza. Para la composición experimental usando el flujo en función a la disponibilidad de la materia prima (9760 kg/d) se obtuvo una producción de 1288,62 m³ de biogás. Se definieron 8 condiciones de contorno para la composición y 11 para el flujo de alimentación, como resultado se alcanzó la mayor producción y calidad de biogás en la composición 6, con una producción de biogás de 1736,40 m³/d para el flujo de alimentación de 9760 kg/d de cachaza, CH₄ un 40,7%, CO₂ un 57,2%, H₂S un 0,12% y NH₃ 2,01% del volumen. Para estas características de composición al biogás se lo utilizaría para red de gas en aplicaciones tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores y uso doméstico ya que para otros usos es necesario realizar un tratamiento posterior.

Palabras claves: Predecir, biogás, cachaza, simulación, modelos matemáticos, estequiometría.

ABSTRACT

The present work has as aim to simulate the anaerobic digestion process to predict the biogas production from the mathematical model application and the utilization of the filter cake mud generated in the sugar no centrifugal of Pastaza's province. Pastaza's filter cake mud was characterized of experimental form and was compared with the literature obtaining a composition of dampness 77,07% and 70,72%, protein 2,04% and 4,39%, lipids 0,38 % and 3,51%, ash 1,23% and 2,93%, saccharose 9,26% and 3,51%, fiber 2,03% and 6,15%, other 8% and 8,78% respectively. With the composition and the stoichiometric equations with reaction chemistries the mathematical stoichiometric model developed to predict the biogas quantity. The simulation fulfilled in the software CHEMCAD 6.3.1 for which it makes possible the calculations of mass balance sheet in a stoichiometric reactor, the model was validated using a supply flow of 1000 kg/d (1 t/d) and the bibliographical composition in ideal conditions 172,98 m³ being obtained of biogas by ton of filter cake mud. For the experimental composition using the flow in function to the raw material availability (9760 kg/d) a biogas production of 1288,62 m³ was obtained. 8 contour conditions were defined for the composition and 11 for the flow of supply, since result reached the major production and quality of biogas in the composition 6, with a biogas production of 1736,40 m³/d for the supply flow of 9760 kg/d of sloth, CH₄ 40,7%, CO₂ 57,2%, H₂S 0,12% and NH₃ 2,01% of the volume. For these characteristics of composition to the biogas one would use it for gas network in such applications as heaters, internal combustion engines or generating systems and domestic use since for other uses it is necessary to realize a later treatment.

Key words: Predict, biogas, filter cake mud, simulation, mathematical models, stoichiometric.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	4
1.1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.1.2. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.2. OBJETIVO GENERAL	5
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
CAPÍTULO II.....	6
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
2.1. ANTECEDENTES	6
2.2. BASES TEÓRICAS	6
2.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE BIOGÁS	6
2.2.1.1. TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	7
2.2.2. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y PANELA CON POTENCIALIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	10
2.2.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	12
CAPITULO III	16
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	16
3.1. LOCALIZACIÓN	16
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	16
3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	17
3.3.1. MÉTODO DE ANÁLISIS Y COMPARATIVO	17
CAPÍTULO IV.....	24
4. RESULTADOS	24
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CACHAZA.....	24
4.1.1. DESDE EL PUNTO DE VISTA BIBLIOGRÁFICO.....	24
4.1.2. NIVEL DE LABORATORIO DE LA CACHAZA	25
4.2. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	28
4.2.1. MODELO DE SIMULACIÓN (REACCIONES ESTEQUIOMÉTRICAS).....	28
4.3. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	28
4.3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENTRADA	29
4.3.2. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE CACHAZA.....	29

4.3.3. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	29
4.3.4. PROCESO DE SIMULACIÓN.	30
4.3.5. CASO BASE DE PRODUCCIÓN SEGÚN LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	30
4.3.5.1. CASO BASE CON EL FLUJO DE PRODUCCIÓN EN PASTAZA	31
4.4. CONDICIONES DE CONTORNO AL MODELO PLANTEADO	33
CAPÍTULO V	36
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
5.1. CONCLUSIONES	36
5.2. RECOMENDACIONES	36
CAPÍTULO VI	38
6. BIBLIOGRAFÍA	38
ANEXOS	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición química de la cachaza.....	11
Tabla 2 Composición detallada de la cachaza	24
Tabla 3 Composición experimental detallada de la cachaza	26
Tabla 4 Ecuaciones estequiométricas con reacción química.....	28
Tabla 5 Estimación de la capacidad	29
Tabla 6 Composición de cachaza: Límites inferior y superior	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama heurístico de la metodología de la investigación	17
Figura 3 (A) Producción de biogás, metano y dióxido de carbono, (B) Producción de amoníaco y sulfuro de hidrógeno	32
Figura 4 Producción de Biogás.....	34
Figura 5 Composición del biogás (metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno) ..	35

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Ecuaciones estequiométricas con reacción química	43
Anexo 2 Esquema tecnológico para la producción de biogás	44
Anexo 3 Resultados de la simulación con el flujo de producción de cachaza en Pastaza...	44
Anexo 4 Condiciones de contorno para la composición	44
Anexo 5 Resultados de la simulación por composición	45
Anexo 6 Composición del biogás	46

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo se producen una gran cantidad de residuos sólidos los cuales generan graves problemas por el deterioro progresivo del medio ambiente y desde el punto de vista económico puesto que los costos de recolección, transporte y disposición final son cada vez mayores (Cardona et al., 2004). Sin embargo, actualmente se ha visto una gran oportunidad para su aprovechamiento como fuente de energía renovable haciendo del tratamiento anaerobio, una tecnología atractiva, poco costosa y cuyo producto (biogás y digestato) tienen un alto valor agregado (López et al., 2012).

Según (Camargo & Williams, 2012; Martínez et al., 2014; Pinos et al., 2012) la producción de biogás se produce como resultado de someter al estiércol, o a cualquier otro deshecho orgánico de la producción agrícola y agroindustrial (residuos lácteos, cárnicos, bagazos, cachaza, vinazas, etc.), a la acción de bacterias anaeróbicas en un proceso llamado biodigestión. En los biodigestores se mezcla el material orgánico con agua a temperaturas adecuadas de entre 20 y 30 grados, donde se origina la reacción que produce el biogás.

El proceso se realiza en cuatro etapas (González et al., 2015) de degradación anaeróbica de residuos orgánicos como la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La hidrólisis es donde la materia orgánica se fermenta produciendo compuestos sencillos en monómeros solubles y dímeros. En la acidogénesis las bacterias acidificantes convierten los productos químicos solubles en agua, incluidos los productos de hidrólisis, en ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, aldehídos, dióxido de carbono e hidrógeno.

La fase de acetogénesis es cuando las bacterias acetato, convierten los productos de la fase ácida en acetatos e hidrógeno, aproximadamente el 70% del metano surge en el proceso de reducción de acetatos. La última etapa de metanogénesis el metano se produce a partir de sustratos que son productos de fases anteriores, es decir, ácido acético, H₂, CO₂ y formiato y metanol, metilamina o sulfuro de dimetilo. Los microorganismos producen metano a través de la ruta acetotrófica e hidrogenotrófica (Ziemiński & Fraç, 2012).

La producción de biogás consta de cuatro componentes clave que son materia prima, microorganismos, control del proceso y configuración del reactor o diseño tecnológico (Mel et al., 2015). Según (Cepero et al., 2012; L. Magaña et al., 2006; Siefers et al., 2010) dentro de la composición química del biogás tenemos los componentes de CH₄ entre 40 - 70% en volumen,

entre el 30 - 60% en volumen de CO₂, 1-1.5% (H₂), 0.3-3% N₂ y varias impurezas, especialmente H₂S.

La calidad del biogás es mejor cuanto mayor sea el porcentaje de metano, ya que permite usos similares a los del gas natural (contenido de metano en torno al 92%). Para las aplicaciones más simples de biogás tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, la remoción del CO₂ no es necesaria simplemente pasa a través del quemador o motor. En aplicaciones más complejas, tales como vehículos que requieren combustibles de mayor densidad, el CO₂ debe ser removido. La remoción incrementa el poder calorífico y genera un gas de calidad similar a la del gas natural (Varnero, 2011).

En la producción de biogás se utilizan materias primas como desechos sólidos entre los cuales se encuentran el estiércol de animales, desechos agrícolas, domésticos, e industriales (Basanta et al., 2007). Dentro de los industriales se destacan los lácteos, cárnicos, bagazos, cachaza, aceites usados, vinazas, etc. (Martinez et al., 2014).

Los desechos que se utilizan como materias primas para la digestión anaerobia pueden contener carbohidratos, proteínas, grasas y celulosa como componentes principales. La relación carbono/nitrógeno (C/N) es un factor determinante para la producción de biogás puesto que, valores bajos incrementa el riesgo por exceso de nitrógeno y a su vez la inhibición del proceso, mientras que valores altos indican deficiencia de nitrógeno para la síntesis de biomasa (Montenegro, Rojas, Hernández, & Rojas, 2016).

La cachaza ha sido usada principalmente en el suelo para la agricultura de la caña de azúcar, la alimentación del ganado, extracción de ceras y aceites. Según (Bernal et al., 2017; Ochoa et al., 2010; Valdés, 2015) proponen la oportunidad de recuperar la cachaza y usarla para la producción de biogás, esta cachaza bajo un tratamiento anaeróbico puede producir alrededor de unos 130 a 155 m³ de biogás por tonelada de cachaza.

La provincia de Pastaza tiene un potencial de producción de caña de azúcar de 4 500 ha, con un rendimiento de 55 T/ha. De la producción de caña de azúcar se destina el 40% para elaboración de panela; de la producción total existe un 10% de desperdicio por causa de falta de vías de comunicación, plagas, enfermedades, etc. (Sablón et al., 2016). Se produce caña de azúcar y derivados como panela en ladrillo, panela granulada, aguardiente y caña de fruta, siendo básicamente los únicos productos actualmente elaborados; en condiciones óptimas se producen 840 000 kg de panela/año (ASOCAP, 2017).

En Pastaza se encuentran más de 110 pequeñas fábricas de panela las cuales generan desechos como cachaza, bagazo y aguas residuales que se acumulan en los alrededores de la fábrica, que

pueden ser utilizados como biomasa viable para la generación del biocombustible (ASOCAP, 2017; Sánchez et al., 2010).

Estos residuos que se generan producen contaminación por lo que se busca aprovecharlos por medio de la predicción de la cantidad de biogás que se pudiese obtener de la digestión. A partir de la composición fisicoquímica de los residuos específicamente de la cachaza y el conocimiento fenomenológico se construirá modelos matemáticos del proceso para determinar si el proceso llevado a cabo en el biodigestor va hacer eficiente y optimo (Ramón et al., 2013). La producción de biogás se puede determinar por dos vías fundamentales la experimental con su inherente impacto económico y la estimación a través de la simulación; y los modelos matemáticos. Son varios los ejemplos de aplicación de la simulación en la modelación matemática y en la práctica que impactaron positivamente en el ámbito económico, técnico y ambiental (Diaz et al., 2015; Ribas et al., 2011).

Dentro de los modelos matemáticos se encuentran los fenomenológicos, que buscan predecir el comportamiento observado de la digestión anaeróbica y comprender mejor los fenómenos internos que ocurren en el biodigestor aplicando balances de materia y energía (Fedailaine et al., 2015; Rivera et al., 2009).

La producción se estima a partir de modelos estequiométricos que permiten reproducir el proceso de degradación de la materia orgánica (Rodrigo, 2016) o de modelos cinéticos que se describen por tres fenómenos, sustrato, crecimiento y descomposición bacteriana; producción de metano e inhibición de la actividad bacteriana obteniendo curvas de tendencia de los parámetros y comparando frente a gráficas similares generadas mediante la implementación de modelos como el *Anaerobic Digestion Model N° 1 ADM-1* (González et al., 2015).

El *ADM-1* es un modelo cinético que permite predecir la cantidad de biogás utilizando los componentes principales, procesos bioquímicos y fisicoquímicos que se dan en el proceso. Según (González et al., 2015; Laines & Sosa, 2013) la producción de biogás también se puede predecir mediante el análisis fisicoquímico, midiendo la demanda química de oxígeno (DQO) total, pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), volumen de biogás y gas metano generado.

Una alternativa para diversificar la industria panelera es la producción de biogás a partir de la cachaza, aplicando modelos matemáticos los cuales buscan predecir el comportamiento observado de la digestión anaeróbica para comprender mejor los fenómenos internos que ocurren en el biodigestor y contribuir a mitigar la contaminación al ambiente de este residuo.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

1.1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la provincia de Pastaza existe producción de caña de azúcar la cual se usa para la producción de derivados como panela en ladrillo, panela granulada, aguardiente y caña de fruta, siendo básicamente los únicos productos elaborados produciendo en condiciones óptimas 840 000 kg de panela/año (ASOCAP, 2017).

Los problemas que presenta esta industria es que genera residuos que no se aprovechan, los residuos agroindustriales y agrícolas en su totalidad por desconocimiento de su utilidad o por falta de tecnología adecuada para su transformación son desechados produciendo contaminación al medio ambiente. Como consecuencia no se generan nuevos productos y no se aprovecha el potencial existente para estos residuos.

1.1.2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación pretende proponer una alternativa de aprovechamiento de la cachaza para la producción de biogás puesto que, en la provincia de Pastaza existe 110 paneleras que durante el proceso de producción genera residuos orgánicos como: la cachaza y el bagazo, los cuales no son aprovechados fundamentalmente por desconocimiento de su utilidad o por falta de tecnología adecuada para su transformación y terminan generando contaminación al medio ambiente.

De estos residuos se pueden obtener diferentes coproductos para el caso del bagazo: papel, pulpa, ácido cítrico, glucosa, furfural, ácido láctico, etanol, etc.; y con la cachaza: fertilizante, productos químicos, biocombustibles (biogás y biol).

Según (Bernal et al., 2017; Gupta, Tripathi, & Balomajumder, 2011; Ochoa et al., 2010; Valdés, 2015) la cachaza puede ser utilizada como sustrato para predecir la producción de biogás beneficiando a los diferentes productores de panela, ya que obtendrían un subproducto que a la vez se utilizaría como energía en el caso del biogás y el digestato como fertilizante.

Como lo mencionan (Fedailaine et al., 2015; Mago, Flores, & Tovar, 2012; Rivera et al., 2009) la modelación es una herramienta para conocer la cantidad de biogás que se puede obtener, se utilizará como flujo másico a la cachaza ya que contiene gran cantidad de

materia orgánica que posibilita la producción de biogás mediante su tratamiento anaeróbico. Lo que nos permite formular el siguiente problema de investigación.

1.1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo se puede predecir la cantidad de biogás a partir de los residuos de la industria panelera en la provincia de Pastaza?

1.2. OBJETIVO GENERAL

Simular el proceso de digestión anaerobia para predecir la producción de biogás a partir de la cachaza generada en la provincia de Pastaza.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la producción de biogás a partir de residuos generados por la industria panelera (cachaza).
2. Desarrollar modelos matemáticos (estequiométricos) del proceso de producción de biogás.
3. Evaluar diferentes condiciones de contorno al modelo planteado del proceso de digestión anaerobia y la producción de biogás.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES

La cachaza es el residuo de la industria del azúcar producido de la filtración del jugo de caña (Gupta et al., 2011). Es un sólido blando, esponjoso, amorfo y marrón oscuro el cual contiene azúcar, fibra y coloides coagulados, cera de caña, albuminoides, sales inorgánicas, partículas de suelo y elementos minerales (Salehin et al., 2012).

La cachaza según (Bernal et al., 2017; Gupta et al., 2011; Ochoa et al., 2010; Rincón, Rincón, Mata, & Chirinos, 2014; Salehin et al., 2012; Valdés, 2015) es una buena fuente de producción de biogás ya que presentan un contenido tal de materia orgánica que posibilita su tratamiento anaeróbico.

(Hermida & Lopez, 2003) presenta el diseño, evaluación y beneficios alcanzados en una planta de biogás a partir de la fermentación de cachaza, obteniendo como rendimiento 120 m³ de biogás por tonelada en un tiempo de residencia de 30 días.

Según (Gupta et al., 2011) el volumen de biogás generado por la digestión convencional a través de la mezcla de presión es de alrededor de 65 m³, mientras que a través de la biometanización integrada es de aproximadamente 80 m³/t de cachaza. Al igual que (Rincón et al., 2014) donde la cachaza alcanza una producción de metano de 0,64 L/g SV.

(Valdés, 2015) menciona que la cachaza bajo un tratamiento anaeróbico puede producir alrededor de unos 130 a 155 m³ de biogás por tonelada de cachaza.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE BIOGÁS

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica (Cepero et al., 2012) tales como estiércol de animales, desechos agrícolas, domésticos, e industriales (Rohstoffe, 2010).

El mecanismo predominante para la conversión de la biomasa en biogás es la conversión bioquímica o digestión de biomasa orgánica, que involucra varios procesos bacterianos y enzimáticos simultáneamente. El método más común de producción de biogás es la digestión

anaeróbica en un tanque cerrado llamado ‘biodigestor’ (García, Montero, Coronado, & Acosta, 2013).

El biogás se forma en el biodigestor con una composición química que indica como parte de la composición química del biogás al CH₄ entre 40 - 70% en volumen, entre el 30 - 60% en volumen de CO₂ (Cepero et al., 2012) y otros componentes gaseosos con menos del 7% en volumen (Rosenberg & Kornelius, 2017) como el vapor de agua, sulfuro de hidrógeno (H₂S), pequeños niveles de compuestos orgánicos volátiles (VOC) (Shao, Dal, Kumar, Li, & Singh, 2012), amoníaco (NH₃), hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂) (Čučeka, Hjalilab, Klemešb, & Kravanja, 2017).

La generación de biogás tiene dos variables operacionales de principal interés, la temperatura y tiempo (Yepes, Montoya, & Orozco, 2008). La temperatura de proceso debe estar entre 30 y 40 ° C y el tiempo para alcanzar la producción adecuada de metano depende de la temperatura y de la materia orgánica empleada.

Para la producción de biogás existen tecnologías que permiten obtener el máximo potencial de las materias primas para producción de metano (C. Martínez & García, 2016), se basan en el manejo y operación de los biodigestores que se debe tener en cuenta al momento de proyectar una instalación, algunos criterios de diseño y operación (Varnero, 2011).

2.2.1.1. TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Existen tecnologías como la de (Rojas & Mendoza, 2013) para la obtención de biogás de lodos residuales, donde el proceso consta de las siguientes etapas: Recolección y mezcla, digestión (dos etapas, en el primer tanque los lodos residuales permanecen menor tiempo durante la fase de hidrólisis y acidogénesis, un segundo tanque para las fases de acetogénesis y metanogénesis), absorción (CO₂ y H₂S) y almacenamiento.

La tecnología planteada por (Mantilla, Duque, & Galeano, 2007) cuentan con una planta piloto para la producción de biogás, el proceso comienza con una recolección de la materia prima, mezclado, biodigestión (digestor tipo plug-flow, esta clase de digestor es sin agitación, trabaja sólo con estiércol vacuno y debe cargarse con poca Agua), limpieza del biogás (eliminación de H₂O) y almacenamiento.

Las tecnologías utilizadas en la construcción de digestores anaeróbicos por (Cepero et al., 2012) son: la cúpula fija (modelo chino, se cargan en forma semicontinua. Luego se sigue cargando como un digestor continuo), el tubular plástico o de manga de polietileno con flujo continuo (tipo Taiwán) y la laguna anaeróbica cubierta con una geomembrana de polietileno de

alta densidad. Estos biodigestores abarcaron una capacidad total de digestión de 1 665 m³ y generaron producciones de 600 060 m³ de biogás.

2.2.1.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN LA TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN DE BIOGAS

Los parámetros de operación del digestor anaeróbico son: para las materias primas relación C/N en un rango de 30:1 hasta 20:1 (Rojas & Mendoza, 2013), sólidos totales (ST) para el caso de residuos de animales como bovino 13.4 – 56.2 % ST, porcinos 15 – 49 % ST, hojas secas 50% ST, paja trigo 88 – 90% ST, etc.

La cantidad de agua depende de los sólidos totales de la materia prima en el caso del estiércol de bovino relación estiércol:agua es de 1:1, para porcinos al igual que aves 1:3 (Varnero, 2011) y la capacidad de la biomasa microbiana para convertir materia orgánica en metano expresada como la masa del sustrato en términos de DQO (Escalante, Guzmán, & Castro, 2014), para heces de animales de cría, aguas residuales de mataderos un 3 – 17 g/l DQO y; en aguas residuales agroindustriales y aguas negras de 5 – 18 g/l DQO (Varnero, 2011).

En el reactor se controlan parámetros como el pH que debe ser neutro 6.8-7.2, temperatura mesofílico 25 - 35°C o temperatura termofílica 37 - 65°C, tiempo de retención (TRH) 12 - 32 días, sólidos volátiles (SV) 7-12% (Rojas & Mendoza, 2013).

2.2.1.3. MATERIAS PRIMAS PARA LA FORMACIÓN DE BIOMASA

La composición de los sustratos es el factor principal para determinar el rendimiento y potencial de metano, existen una gran cantidad de sustratos que pueden utilizarse tales como residuos agrícolas, de la producción de alimentos industriales (bagazo, cachaza, vinazas, suero de leche, etc), residuos de origen animal, residuos sólidos municipales, grasas, aceites, residuos domésticos entre otros. Según (Martinez et al., 2014) cada residuo orgánico tiene un potencial específico y existen diferencias notables según su composición.

Muchos de estos residuos agrícolas, industriales y de la industria de los alimentos son elegidos para la digestión anaeróbica ya que poseen adecuadas relaciones C/N (superior a 20) (C. Martínez & García, 2016; Ochoa et al., 2010).

2.2.1.4. ETAPAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es un proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, es complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea y trabajan gran número de microorganismos que degradan la materia orgánica en sucesivas etapas (Lorenzo & Obaya, 2005; Varnero, 2011).

Los estudios bioquímicos y microbiológicos dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas: a) hidrólisis b) acidogénesis c) acetogénesis d) metanogénesis.

2.2.1.4.1. HIDRÓLISIS

Los polímeros orgánicos, como proteínas, polisacáridos y las grasas, se hidrolizan a los monómeros (azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos) (Escalante et al., 2014) por la acción de enzimas del grupo de hidrolasas (amilasas, proteasas, lipasas) producidas por bacterias fermentativas (*Streptococos*, *Enterobacterium*), estas enzimas actúan en el exterior de la célula por lo que se consideran exoenzimas (Lorenzo & Obaya, 2005; J. Magaña, Rubio, Jiménez, & Martínez, 2011).

La etapa hidrolítica puede considerarse un proceso limitante de la velocidad del proceso sobre todo cuando se trata con residuos de alto contenido de sólidos, esta etapa depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención, composición del sustrato y concentración de productos de la hidrólisis (Varnero, 2011).

2.2.1.4.2. ACIDOGÉNESIS

Fase de acidificación donde las bacterias convierten los productos químicos solubles en agua, incluidos los productos de hidrólisis, en ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, aldehídos, dióxido de carbono e hidrógeno. Entre los productos de la acidogénesis se encuentran el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno. Las bacterias de fase ácida pertenecen a los siguientes géneros: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Micrococcus* o *Flavobacterium* (Ziemiński & Frąc, 2012).

La importancia de este grupo de bacterias no es solo por que produce el alimento para las bacterias que actúan posteriormente, también eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema (Varnero, 2011).

2.2.1.4.3. ACETOGÉNESIS

Los ácidos grasos volátiles (AGV) se convierten en acetato e hidrógeno por la acción de bacterias acetogénicas (J. Magaña et al., 2011) incluidas las de los géneros *Syntrophomonas* y *Syntrophobacter*. Es una fase que describe la eficiencia de la producción, porque aproximadamente el 70% del metano surge en el proceso de reducción de acetatos (Ziemiński & Frąc, 2012).

Las reacciones acetogénicas requieren la adición de energía, lo cual implica la interacción entre

las poblaciones de microorganismos acetogénicas y los microorganismos que consumen hidrógeno (Cendales & Jiménez, 2014).

2.2.1.4.4. METANOGÉNESIS

El metano en esta fase del proceso se produce a partir de sustratos que son productos de fases anteriores, es decir, ácido acético, H₂, CO₂ y formiato y metanol, metilamina o sulfuro de dimetilo (Ziemiński & Fraç, 2012). Requiere de bacterias acetoclásticas metanogénicas para convertir el acetato en metano y dióxido de carbono, aproximadamente el 70% de metano es producido por metanógenos acetoclásticos.

Se puede establecer una clasificación de las bacterias metanogénicas en dependencia del sustrato que utilizan en su metabolismo, en grupos como hidrogenotróficos, que consumen hidrógeno y ácido fórmico; y los denominados metilotróficos o acetoclásticos, los cuales metabolizan los grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas (Cendales & Jiménez, 2014).

Durante la digestión de desechos sólidos, solo el 50% de los compuestos orgánicos experimentan biodegradación. La parte restante de los compuestos permanece en su estado primario debido a la falta de enzimas que participan en su degradación (J. Magaña et al., 2011).

2.2.2. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y PANELA CON POTENCIALIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La agroindustria de la caña de azúcar es una de las más importantes, un problema ecológico que enfrenta es la alta generación de residuos durante el proceso (Berrospe, Ordaz, Rodríguez, & Quintero, 2012), se genera por cada tonelada de tallos molidos, 250 kg de bagazo, 6 kg de cenizas, 45 kg de melaza y 30 kg de cachaza (Madrid & Castellanos, 2011).

Los principales residuos del proceso de la industria azucarera y panelera son, la cachaza y bagazo que representan una dificultad ya que su disposición final da origen a problemas de contaminación. Es por ello que la industria busca soluciones que apuntan hacia la conversión de sus residuos a subproductos (Zúñiga & Gandini, 2013) ya que la caña de azúcar puede proporcionar diferentes biomásas para ser usadas como combustible (Berrospe et al., 2012; Quiroz & Pérez, 2013; Valdés, 2015).

2.2.2.1. BAGAZO

El bagazo es la parte fibrosa de la caña de azúcar, es el residuo del proceso industrial de fabricación del azúcar o panela, en la etapa de extracción (Bohórquez, Puentes, & Menjívar, 2014; Ochoa et al., 2010; Valdés, 2015). El bagazo de caña es un residuo disponible en grandes

cantidades y presenta una composición química muy similar a la madera (Aguilar, Rodríguez, & Castillo, 2010).

El bagazo es un subproducto que se usa como material en el proceso de producción de diferentes productos como combustible (Ochoa et al., 2010) y en la producción de energía (vapor) mediante su combustión en las calderas (Aguilar et al., 2010). En la industria se usa para producir papel y productos relacionados como platos compostables, tazones biodegradables, envases de alimentos ecológicos. También para fabricar productos químicos tales como furfural, xilitol, así como carbón activado (Ochoa et al., 2010).

2.2.2.2. CACHAZA

La cachaza es un residuo de la industria azucarera y panelera que no se reincorporan al proceso (Forero, Fernández, & Álvarez, 2010), rico en materia orgánica, calcio, fósforo y nitrógeno (Bohórquez et al., 2014). Se forma a partir de los lodos formados por las impurezas, ceras, hidrocarburos y azúcares que aporta la caña (Quiroz & Pérez, 2013).

Esta es de color pardo oscuro (Arreola et al., 2004), húmeda tiene una DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno durante 5 días) de 55 kg/m y su composición química (Ochoa et al., 2010). La composición química de la cachaza se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1 Composición química de la cachaza

Composición química de la cachaza		
Componentes	Uni	Referencias
Densidad (g/L)	180	
Relación C/N	38,4	(Aguilar et al., 2010)
pH	7,22	
Humedad (%)	70,72	
Base seca (%)		
Proteína cruda	4,39	
Lípidos	3,51	
Ceniza	2,93	(Gálvez, Cabello, & Villamil, 2000)
Sacarosa	3,51	
Fibra	6,15	
Otros	8,78	

La cachaza representa un problema ya que genera mal olor y, en muchas ocasiones, es un foco de infección y un riesgo para la conservación del ambiente (Arreola et al., 2004). Existen propuestas para el manejo y aprovechamiento de la cachaza, por lo que es considerada como subproducto beneficioso económica y ecológicamente (Berrospe et al., 2012).

Según (Ochoa et al., 2010; Valdés, 2015) mencionan que existen alternativas para su aprovechamiento, en la agricultura se usa como fertilizante en forma de compost para enmendar estructuralmente el suelo. Por tener un contenido tal de materia orgánica también posibilita la producción de biogás, bajo un tratamiento anaeróbico puede producir alrededor de unos 130 a 155 m³ de biogás por tonelada de cachaza.

2.2.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La modelación matemática de procesos es una herramienta de gran utilidad ya que permite conocer, entender e interpretar un sistema biológico en el proceso de toma de decisiones. El desarrollo de estos modelos matemáticos cada vez más detallados y precisos se utiliza en el diseño, escalado, optimización y control de procesos de una forma rápida y económica (García, Otero, & Rodríguez, 2012; Ribas et al., 2011).

Los modelos desarrollan la simulación de procesos bioquímicos mediante la simplificación de las cinéticas de las reacciones bioquímicas y la composición de sustratos complejos (Cendales & Jiménez, 2014). Se han constituido en una herramienta básica para el diseño, operación y control de los sistemas anaeróbicos (Rivera et al., 2009).

La necesidad de predecir el comportamiento de un sistema motivó el desarrollo de modelos que permitieran representar las condiciones, sobre las especies químicas y biológicas involucradas en el proceso anaeróbico (Cendales & Jiménez, 2014).

Las entidades a modelar en una fermentación son la biomasa, el sustrato (a partir la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas) por su caracterización), el producto, el oxígeno y el calor, fundamentalmente. La modelación matemática de este proceso incluye la descripción cinética, a nivel del microorganismo y del bio-reactor (Ribas et al., 2011).

2.2.3.1. MODELOS FENOMENOLÓGICOS

Según (Alvarez, Lamanna, Vega, & Revollar, 2009; Ersahin, Gomec, Dereli, Arıkan, & Ozturk, 2010; Fedailaine et al., 2015; Laines & Sosa, 2013; Ribas et al., 2011; Rivera et al., 2009) mencionan que los modelos fenomenológicos están basados en fundamentos teóricos que permiten explicar perfectamente el comportamiento del proceso, permiten predecir el comportamiento observado de la digestión anaeróbica y comprender mejor los fenómenos internos que ocurren en el digestor.

Las ecuaciones que describen fenomenológicamente el comportamiento de este proceso se deducen a partir de balances de materia (Hernández & Aguirre, 2005), de energía y de cantidad

de movimiento, adicionados con un grupo de ecuaciones constitutivas: ecuaciones cinéticas, estequiométricas, etc. (Gómez, Amicarelli, Alvarez, & di Sciascio, 2004).

El modelo se obtiene aplicando balances de materia por la ecuación general de la Ley de conservación de la masa aplicada tiene la siguiente expresión (Ec. 1)

$$\begin{aligned} \text{Acumulación} &= \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} && \text{Ec. 1} \\ 0 &= \text{Flujo de entrada} - \text{Salida} + \underbrace{\text{Generación} - \text{Consumo}}_{\text{Estequiometría}} \end{aligned}$$

2.2.3.1.1. MODELO ESTEQUIOMÉTRICO

Las reacciones químicas consisten básicamente en la transformación de compuestos complejos en compuestos más simples y estables, los modelos para predecir el biogás se estiman a partir de ecuaciones estequiométricos con reacción química que buscan reproducir el proceso de degradación de la materia orgánica. La estequiometría de las reacciones está influenciada por los microorganismos que actúan en la reacción, así como por los sustratos utilizados y las condiciones impuestas sobre el proceso (Fernández, Dustet, & Chico, 2012).

A partir del conocimiento de la composición de los residuos es decir, de la materia orgánica contenida en ellos se establece una reacción general para calcular la producción de metano y dióxido de carbono (Rodrigo, 2016). Según (Peris, 2010) tiene la siguiente expresión (Ec. 2):



$$x = 1/8 * (4c + h - 2o - 3n - 2s)$$

$$y = 1/4 * (4c + h - 2o - 3n - 2s)$$

2.2.3.1.2. MODELOS CINÉTICOS

El modelo cinético se describe por tres fenómenos, sustrato, crecimiento y descomposición bacteriana; producción de metano e inhibición de la actividad bacteriana. (Fedailaine et al., 2015). Los modelos se clasifican en: modelos estructurados, modelos de sistemas de enzimas donde se incluye información sobre la ruta metabólica y modelos no estructurados donde se toma en cuenta el estado fisiológico de una población de microorganismos.

Se estiman a partir del análisis de la composición de los residuos, de acuerdo con las características matemáticas, se debe utilizar algoritmos apropiados para estimar los parámetros con respecto a las condiciones del proceso (Ribas et al., 2011).

Balance de masa (Ec. 3) según (Fedailaine et al., 2015):

$$Q_i X_i + \mu X V_t = Q_f X_f + V_t \frac{dX}{dt} + K_d X V_t \quad \text{Ec. 3}$$

Q_i , Q_f : son los flujos de entrada y salida del líquido

X_i , X_f : concentración de biomasa en la entrada y la salida (g / L).

V: volumen del digestor (L).

μ : es la tasa de crecimiento de microorganismos anaerobios (día-1)

K_d : es la tasa de desprendimiento de microorganismos (día-1)

2.2.3.1.2.1. Anaerobic Digestion Model N° 1 ADM-1

Es un modelo cinético que fue desarrollado por el grupo *Internacional Water Association IWA*, permite la descripción matemática de la digestión anaerobia de sustratos orgánicos por su composición orgánica e inorgánica (Rivera et al., 2009; Zhao et al., 2009). Consta de varios pasos para simular todas las reacciones posibles que ocurren en la biodegradación anaeróbica, incluyen reacciones biológicas también procesos físico-químicos (Silva, Nadais, Prates, Arroja, & Capela, 2009).

En el *Anaerobic Digestion Model N° 1 ADM-1* se usa la ecuación cinética de primer orden para describir la hidrólisis y la descomposición microbiana, y la ecuación de Monod para interpretar la captación de componentes solubles y la producción de gas (Zhao et al., 2009), fue implementado en la plataforma de *MATLAB/SIMULINK*, en forma de diagramas de bloques para representar las ecuaciones que conforman el modelo (Cendales & Jiménez, 2014).

También se puede realizar con el software *SIMBA versión 4.0*, que se ejecuta bajo el entorno de simulación *MATLAB / SIMULINK* (Lübken, Wichern, Schlattmann, Gronauer, & Horn, 2007). Al igual que en *AQUASIM 2.0*, el cual se usa para modelar los procesos biológicos, principalmente para estimar coeficientes y parámetros involucrados en un modelo de biorreacción (Zhao et al., 2009).

2.2.3.1.3. MODELOS DE DQO, SV Y ST

La demanda química de oxígeno (DQO) es uno de los métodos de análisis más utilizados como indicador para identificar las características de un residuo (Laines & Sosa, 2013). La producción de metano puede estimarse a partir de la DQO tomando en cuenta los factores que afectan la cantidad de gas producido como son la temperatura, el pH, la alcalinidad, las tasas de carga hidráulica y orgánica, la presencia de sustancias tóxicas e inhibitorias, el tipo de sustrato y el contenido de ST / SV (Ersahin et al., 2010).

Para el presente proyecto de investigación se desarrollará los modelos estequiométricos para predecir la cantidad de biogás que se puede obtener.

2.2.4. SIMULADORES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos han ganado en complejidad por lo que bajo las condiciones del diseño de experimentos, la simulación del modelo surge como una herramienta para resolver y analizar los resultados obtenidos (Hernández & Aguirre, 2005). Para la simulación del proceso de producción de biogás se pueden utilizar diferentes softwares como:

Según (Kabir, Rajendran, Taherzadeh, & Horváth, 2015; Kwiatkowski, McAloon, Taylor, & Johnston, 2006; Mel et al., 2015) el SuperPro Designer para calcular automáticamente balances de masa y energía, el volumen de cada proceso de unidad, manejan la composición de materias primas y productos, la estimación del capital y los costos operativos, los ingresos de productos y coproductos. A partir de la simulación, se puede observar la producción biogás.

Según (Gopaul & Dutta, 2015; Shafiei, Kabir, Zilouei, Horváth, & Karimi, 2013) el software de simulación Aspen Plus permite una simulación y análisis sencillos de procesos termodinámicos ya que incluye una completa base de datos de propiedades físicas y termodinámicas. La interfaz consiste en modelar unidades de proceso tales como reactores e intercambiadores de calor que están conectados con corrientes de flujo de material y energía.

Según (Abd, Eldrainy, & Attia, 2016; Ekwonu, Perry, & Oyedoh, 2013) el programa de software de simulación Aspen HYSYS es un programa que ofrece una base completa de termodinámica para calcular propiedades físicas, de transporte y para el diseño del proceso de tratamiento de gases, industrias de petróleo y refinería.

Para simular el proceso de producción de biogás se utilizará el simulador *CHEMCAD 6.3.1* que según (Toselli, Guerrero, Monesterolo, & Beltrán, 2009) posibilita evaluar las condiciones de funcionamiento de un proceso o equipo, realizar su dimensionamiento, propone alternativas de operación mediante modificación de sus variables, dispone de un amplio banco de datos de componentes y la posibilidad de incorporar nuevos.

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN

La presente investigación se desarrolló en la Universidad Estatal Amazónica, ubicada en el Km 2 ^{1/2} vía al Tena (Paso lateral), Cantón Puyo, Provincia de Pastaza, se ubica en el centro de la región amazónica ecuatoriana (RAE), entre las coordenadas 1° 10´ latitud sur y 78° 10´ longitud oeste y 2° 35´ latitud sur y 76° 40´ longitud oeste. Cuenta con una superficie de 29.773 km² (Benítez et al., 2015).

La investigación se llevó a cabo en un tiempo de 400h, en las que se consideraron la obtención de datos, tabulación, modelación matemática y simulación del proceso.

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Durante la investigación se utilizó datos recopilados a nivel mundial, del Ecuador y de la provincia de Pastaza, sobre la agroindustria de la caña de azúcar y la utilización de residuos del proceso como la cachaza para la elaboración de subproductos. Donde se aplicó una serie de pasos para obtener los modelos matemáticos y la simulación del proceso de producción de biogás, mismo que ayudara con la predicción de cuanto biogás se puede obtener.

El carácter del estudio será de forma cuantitativa ya que se va a predecir mediante la utilización de modelos matemáticos y simulación, la cantidad de producto a obtenerse a partir de una cierta cantidad de cachaza.

El tipo de investigación que se realizó es exploratorio y descriptivo, ya que la presente investigación se basa en recopilación bibliográfica y planteamiento del modelo matemático que describe el proceso de producción de biogás a partir de residuos.

En este estudio se describen las características específicas para el proceso de producción de biogás, adquiriendo información sobre la cantidad de cachaza que se va a utilizar. Se realizó los modelos matemáticos aplicando balances de masa y energía en dependencia de las características físico-químicas de la cachaza, a partir de esto se realizó la simulación del proceso para así predecir la cantidad de biogás que se puede obtener.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

3.3.1. MÉTODO DE ANÁLISIS Y COMPARATIVO

El método que se utilizó durante la investigación es de análisis, a partir del cual se construyeron los modelos fenomenológicos de balances de masa y energía que describen el proceso de biodegradación anaeróbica. Por medio de la utilización del simulador se predijo la cantidad y composición de biogás que se produce durante el proceso.

Para el método comparativo se utilizó bibliografías de investigaciones similares para comparar los datos obtenidos de la simulación, concluyendo la eficiencia del proceso para determinar las materias primas que se pueden aprovechar.

Para el cumplimiento del presente proyecto se ha propuesto objetivos específicos que se describen a partir de la Figura 1, partiendo de:



Figura 1 Diagrama heurístico de la metodología de la investigación

3.3.1.1. RECUPERACIÓN DE INFORMACIÓN

La información sobre las características físico-químicas de los residuos generados por las paneleras específicamente de la cachaza, estimación de la cantidad de materia prima y los parámetros para la simulación, se obtuvo a través de fuentes secundarias.

Fuentes secundarias: Artículos científicos, tesis, libros, manuscritos, manuales, documentos gubernamentales, página web.

Se realizó la búsqueda por medio de palabras claves como biogás, cachaza, Digestion anaerobia, residuos de la industria panelera, modelos matemáticos y estequiométricos, simulación de procesos de digestión anaerobia, composición de la cachaza, etc. La información se obtuvo de base de datos de alcance global como *Springer Science, Wiley InterScience, Elsevier, Taylor & Francis Group* y de alcance regional como *Scielo y Redalyc*.

3.3.1.2. CARACTERIZACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y EXPERIMENTAL

Se caracterizó la cachaza buscando bibliográficamente la composición físico-química mediante el uso de artículos científicos y manuales, esto nos permitirá recopilar la información necesaria para usar estas características en la modelación y simulación del presente proyecto.

Mediante la experimentación se obtuvo los parámetros necesarios para caracterizar a la cachaza, estos incluyen el contenido de humedad (AOAC 2012, Método 948.12), ceniza (AOAC 2012, Método 935.42), proteína (AOAC 2012, Método 990.03), grasa (AOAC 2012, Método 920.39) y fibra cruda (AOAC 2012, Método 978.01) utilizando los métodos descritos en la *Association of official analytical chemist (AOAC)* (AOAC International, 2012).

3.3.1.2.1. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

Se basa en la determinación gravimétrica de la pérdida de masa, de la muestra desecada hasta masa constante en estufa de aire. El análisis se debe efectuar en duplicado, colocar en la cápsula de vidrio destapada y la tapa durante al menos 1 hora en la estufa a la temperatura de secado del producto, empleando pinzas, trasladar la cápsula tapada al desecador y dejar enfriar durante 30 a 45 min y pesar la cápsula con tapa en una balanza analítica con una aproximación de 0.1 mg. Registrar (m_1). Para calcular el porcentaje de húmeda se utiliza la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

m_1 : masa de la cápsula vacía y de su tapa, en gramos

m_2 : masa de la cápsula tapada con la muestra antes del secado, en gramos

m_3 : masa de la cápsula con tapa más la muestra desecada, en gramos

3.3.1.2.2. DETERMINACIÓN DE CENIZA

Destrucción de la materia orgánica presente en la muestra por calcinación, los constituyentes minerales permanecen en el residuo como óxidos, sulfatos, fosfatos, silicatos y cloruros, dependiendo de las condiciones de incineración y la composición del producto incinerado. Este residuo inorgánico es el constituyente de las cenizas.

Para la determinación primero Pesar el crisol en una Balanza analítica sensible al 0.1 mg y anotar su peso, Sobre el mismo pesar 2 gr de muestra molida, transferir a una hornilla eléctrica para quemar la muestra hasta carbonización, colocar el crisol en la mufla e incinerar a 600 °C durante horas, colocar en el desecador para que se enfríe, pesar y realizar los cálculos

Formula

$$\%C = \frac{m_2 - m}{m_1 - m} * 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

C= Contenido de ceniza en % de masa

m= Peso del crisol vacío, en gr

m_1 = Peso de crisol más muestra en gr

m_2 = Peso del crisol con la ceniza en gr

3.3.1.2.3. DETERMINACIÓN DE PROTEÍNA

Se basa en la destrucción de la materia orgánica con ácido sulfúrico concentrado, formándose sulfato de amonio que en exceso de hidróxido de sodio libera amoníaco, el que se destila recibéndolo en:

- a) Ácido sulfúrico donde se forma sulfato de amonio y el exceso de ácido es valorado con hidróxido de sodio en presencia de rojo de metilo, o
- b) Ácido bórico formándose borato de amonio el que se valora con ácido clorhídrico.

Para la determinación se pesa 1 gr de muestra en una balanza analítica sensible al 0.1mg previamente molida en papel grueso y colocar en el tubo de digestión en forma de paquete que no se adhiere al tubo la muestra, luego adicionar la pastilla Kjeldahl y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado. Colocar los tubos en la unidad de digestión Kjeldahl el cual debe estar a 370 – 400 °C, abrir la llave de extracción de gasea al vacío y digester por 2 horas.

Retirar los tubos del digester, dejar enfriar evitando que se endurezca, añadir 65 ml de agua destilada, agitar suavemente y dejar enfriar. En una fiola de 250 ml agregue 35 ml de ácido bórico al 2% y 3 gotas de indicador Tashiro y colocar en la unidad de destilación Kjeldahl de tal forma que el tubo de condensado quede sumergido en dicha solución.

Luego añadir 60 ml de hidróxido de sodio al 45.4 % al tubo de digestión y colocar en el equipo destilador. Destilar por 10 min hasta que se halla recogido aproximadamente 100-150 ml en la fiola y titular con ácido sulfúrico 0.2 N hasta cambio de color de verde a púrpura, anotar el consumo y realice los cálculos

Realice un blanco con todos los reactivos sin la muestra siguiendo el mismo método para la determinación.

Fórmula

$$P = \frac{V * N * F * 0.014 * 100}{M} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

P= Contenido de proteína

V= ml de ácido sulfúrico consumida

N= Normalidad del ácido

F= Factor para convertir el contenido de nitrógeno a proteína 6.25 proteína en general y 5.7 trigo y polvillo.

m= Peso de muestra en gr

3.3.1.2.4. DETERMINACIÓN DE LÍPIDOS

Una cantidad previamente homogeneizada y seca, medida o pesada del alimento se somete a una extracción con éter de petróleo o éter etílico, libre de peróxidos o mezcla de ambos. Posteriormente, se realiza la extracción total de la materia grasa libre por soxhlet.

Determinar pesando en una balanza analítica sensible de 0.1 mg 2 gr de muestra seca (libre de humedad) en papel filtro y formar un paquetito, pesar el balón de extracción de cuello esmerilado. Colocar el paquete de muestra en la cámara central con sifón del aparato extractor labconco y colocar en el balón 70 – 80 ml de éter de petróleo y adaptar el mismo al aparato de extracción soxhelt de 6 hornillas.

Encender el equipo en escala de temperatura de 6.5 y, mantener constante el volumen de éter y efectuar la extracción a reflujo por 2 – 4 horas dependiendo el contenido de grasa de la muestra. Una vez terminada la extracción, retirar el paquete de muestra y colocar en la estufa por 3 – 5 minutos (esta muestra sirve para determinar el contenido de Fibra).

Destilar el solvente en el mismo equipo y colocar el balón y su contenido en la estufa a 100 – 110 °C por media hora, enfriar en el desecador, pesar y realizar cálculos

Formula

$$G = \frac{m_1 - m_2}{m} * 100 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

G= Contenido de grasa, en %

m₁= Peso del balón + grasa extraída

m₂= Peso del balón vacío

m= Peso de muestra desengrasada

3.3.1.2.5. DETERMINACIÓN DE FIBRA

Se entiende por fibra cruda el residuo lavado, secado y pesado que queda luego de la digestión de la muestra desengrasada con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio diluido sucesivamente. Este tratamiento proporciona una fibra cruda que consiste en celulosa, lignina, Hemicelulosa y otros contenidos en la muestra original.

Se realiza por el método Weende pesando 1 gr de muestra previamente desengrasada en una balanza analítica sensible de 0.1 mg luego colocar en el vaso de precipitación adicionado 150 ml de ácido sulfúrico 0.255 N. Hervir durante 30 minutos (contados a partir desde el momento que empiece la ebullición) usar el Antiespumante (OCTYL alcohol) si es necesario, filtrar en caliente, lavar con agua destilada hasta que todo el ácido se halla

eliminado, colocar el residuo en el mismo vaso de precipitación y adicionar 150 ml de hidróxido de sodio 0.313 N

Volver a hervir durante 30 minutos (contados a partir desde el momento que empiece la ebullición), filtrar en caliente, lavar con agua destilada hasta que todo el ácido se halla eliminado y después del último lavado enjuagar 3 veces el residuo con 10 ml de alcohol potable. Colocar el residuo en un crisol y meter a la estufa hasta sequedad, colocar en desecador, pesar, colocar en la mufla durante 30 minutos, pesar y realizar los cálculos

Formula

$$F = \frac{m_1 - m_2}{m} * 100 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

F= Contenido de fibra en %

m₁= Peso de crisol + muestra (estufa)

m₂= Peso del crisol + muestra (mufla)

m= Peso de muestra desengrasada

A partir de la revisión bibliográfica y la caracterización a nivel de laboratorio se podrá obtener la composición y las ecuaciones estequiométricas.

3.3.1.3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO

Para el planteamiento del modelo se tomara la expresión (Ec. 9) establecida por (Peris, 2010), que mediante los resultados obtenidos de la caracterización tanto bibliográfica como experimental podremos obtener las ecuaciones estequiométricas de cada componente. Con la formula química reemplazaremos los valores de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre en la ecuación 2 de la fundamentación teórica, obteniendo la cantidad de metano, amoniaco, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono.

3.3.1.4. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN

La simulación se realizó en el software *CHEMCAD 6.3.1* con los datos investigados, experimentales y los parámetros operacionales, mediante un esquema tecnológico a partir de los pasos que realizaron (Julián, Baltá, Pérez, & Pérez, 2018) de la producción de biogás de manera virtual.

El programa realiza los cálculos de los balances de masa en el biodigestor, para las corrientes de entrada se ingresa cada componente de la composición, para el flujo de producción en Pastaza se realizará la estimación de la capacidad tentativa diaria de cachaza a partir de la Ecuación 9 propuesta por (Pomavilla, 2018) y el parámetro de operación de la temperatura.

$$CCPD = \frac{PC * CCU * RC * PP * CE}{d} \quad \text{Ec. 9}$$

PC: Producción de caña de azúcar

CCU: % de cultivo de caña de azúcar útil

RC: Rendimiento estimado de caña

PP: % destinado para la producción de panela

CE: % de cachaza extraída se tomó de lo establecido por (Aguilar et al., 2010; Bernal et al., 2017) que equivale del 3 – 5%.

d: Días del año

CCPD: Cantidad de cachaza tentativa de producción diaria

3.3.1.5. DIFERENTES CONDICIONES DE CONTORNO

Con los datos obtenidos evaluamos diferentes condiciones de contorno a los modelos planteados del proceso de digestión anaeróbico, se estableció los límites tanto superior como inferior de la composición de la cachaza y en torno a eso se simuló con las diferentes características observando cómo cambia la producción de biogás y la calidad del mismo en cuanto a la cantidad de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

3.3.1.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados se compararan con bibliografías de artículos científicos similares que nos permita determinar la eficiencia del proceso con las diferentes composiciones bibliográficas y experimentales de la materia prima, para obtener la mejor producción de biogás y el uso que se le pudiese dar.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CACHAZA

4.1.1. DESDE EL PUNTO DE VISTA BIBLIOGRÁFICO

Los residuos de la industria de la caña de azúcar y panela con potencialidad para la producción de biogás es la cachaza, de la cual se determinó mediante revisión bibliográfica las características físico-químicas de la cachaza. En la tabla 2 se encuentran especificados cada componente obtenido de artículos científicos y manuales, para estos valores se realizó cálculos que permitieran obtener el 100% de su composición, esto se obtuvo con el valor medio de sus límites tanto inferior como superior.

Tabla 2 Composición detallada de la cachaza

Composición detallada de la cachaza		
Componentes	Base seca (%)	Autor
Proteína cruda	4,39	
Acido aspártico	0,56	
Treonina	0,33	
Acido glutámico	0,47	
Metionina	0,06	
Isoleucina	0,27	
Alanina	0,74	
Valina	0,45	(Gálvez et al., 2000)
Leucina	0,46	
Tirosina	0,08	
Fenilalanina	0,17	
Triptofano	0,15	
Histidina	0,28	
Lisina	0,27	
Argina	0,12	
Lípidos	3,51	
Ác. Mirístico	0,013	
Ác. Palmítico	0,385	
Ác. Esteárico	0,082	(R. Martínez, Castro, & Oliveros, 2002)
Ác. Oleico	0,084	
Ác. Linoleico	0,025	
Ác. Linolénico	0,040	

Ác. Araquidónico	0,004	
n-tetracosanoico	0,013	
n-hexacosanoico	0,006	
n-octacosanoico	0,488	
n-nonacosanoico	0,023	
n-triacontanoico	0,286	
n-dotriacontanoico	0,158	
n-tetatriacontanoico	0,212	
Stigmasterol	0,524	
Campesterol	0,572	
β-sitosterol	0,602	
Ceniza	2,93	(Gálvez et al., 2000)
Si	0,189	
Zn	0,357	
Fe	1,401	
Mg	0,490	(Aguilar et al., 2010)
Cu	0,028	
Mn	0,112	
Al	0,350	
Sacarosa	3,52	(Gálvez et al., 2000)
Fibra	6,15	
Celulosa	4,378	
Hemicelulosa	1,181	(Ochoa et al., 2010)
Lignina	0,59	
Otros	8,78	(Gálvez et al., 2000)
n-tetracosanol	0,712	
n-hexacosanol	0,558	
n-heptacosanol	0,294	
n-octacosanol	6,086	(R. Martínez et al., 2002)
n-nonacosanol	0,294	
n-triacontanol	0,872	
n-dotriacontanol	0,172	
n-tetatricontanol	0,335	

La caracterización bibliográfica fue compleja puesto que no existía información de muchos autores, esta se realizó a partir de autores como (Aguilar et al., 2010; Gálvez et al., 2000; R. Martínez et al., 2002; Ochoa et al., 2010) de artículos de *Springer Science*, *Scielo* y manuales para determinar la composición físico-química de la cachaza.

4.1.2. NIVEL DE LABORATORIO DE LA CACHAZA

Se caracterizó la cachaza a nivel de laboratorio mediante la determinación de humedad (AOAC 2012, Método 948.12), ceniza (AOAC 2012, Método 935.42), proteína (AOAC 2012, Método 990.03), grasa (AOAC 2012, Método 920.39) y fibra cruda (AOAC 2012,

Método 978.01) utilizando los métodos descritos en (AOAC International, 2012). En la tabla 3 se encuentran especificados cada componente, en torno a los resultados obtenidos para el caso de azúcares y otros (alcoholes), se realizó por despeje basándonos en la bibliografía, en el caso de la composición detallada se tomaron los datos bibliográficos y se estableció su composición para cada uno en base a los resultados obtenidos en el laboratorio para el 100% de su composición.

Tabla 3 Composición experimental detallada de la cachaza

Composición detallada de la cachaza			
Componentes	Caracterización bibliográfica	Resultados Experimentales	Autor
Proteína cruda	4,39	2,04	
Acido aspártico	0,56	0,26	
Treonina	0,33	0,15	
Acido glutámico	0,47	0,22	
Metionina	0,06	0,03	
Isoleucina	0,27	0,12	
Alanina	0,74	0,34	
Valina	0,45	0,21	(Gálvez et al., 2000)
Leucina	0,46	0,21	
Tirosina	0,08	0,04	
Fenilalanina	0,17	0,08	
Triptofano	0,15	0,07	
Histidina	0,28	0,13	
Lisina	0,27	0,12	
Argina	0,12	0,05	
Lípidos	3,51	0,38	
Ác. Mirístico	0,013	0,0014	
Ác. Palmítico	0,385	0,0412	
Ác. Esteárico	0,082	0,0088	
Ác. Oleico	0,084	0,0090	
Ác. Linoleico	0,025	0,0027	
Ác. Linolénico	0,04	0,0043	(R. Martínez, Castro, & Oliveros, 2002)
Ác. Araquidónico	0,004	0,0004	
n-tetracosanoico	0,013	0,0014	
n-hexacosanoico	0,006	0,0006	
n-octacosanoico	0,488	0,0522	
n-nonacosanoico	0,023	0,0024	
n-triacontanoico	0,286	0,0306	

n-dotriacontanoico	0,158	0,0169	
n-tetratriacontanoico	0,212	0,0226	
Stigmasterol	0,524	0,0561	
Campesterol	0,572	0,0612	
β -sitosterol	0,602	0,0644	
Ceniza	2,93	1,23	(Gálvez et al., 2000)
Si	0,189	0,079	
Zn	0,357	0,150	
Fe	1,401	0,587	
Mg	0,49	0,205	(Aguilar et al., 2010)
Cu	0,028	0,012	
Mn	0,112	0,047	
Al	0,35	0,147	
Sacarosa	3,52	9,26	(Gálvez et al., 2000)
Fibra	6,15	2,03	
Celulosa	4,378	1,442	
Hemicelulosa	1,181	0,389	(Ochoa et al., 2010)
Lignina	0,59	0,194	
Otros	8,78	8	(Gálvez et al., 2000)
n-tetracosanol	0,712	0,157	
n-hexacosanol	0,558	0,508	
n-heptacosanol	0,294	0,268	
n-octacosanol	6,086	5,543	(R. Martínez et al., 2002)
n-nonacosanol	0,294	0,268	
n-triacontanol	0,872	0,794	
n-dotriacontanol	0,172	0,157	
n-tetratricontanol	0,335	0,305	

Los resultados obtenidos de la experimentación (Tabla 3) muestran una composición inferior al bibliográfico puesto que, durante el proceso de producción de panela antes de alcanzar la ebullición algunas de las partículas coloidales dispersas en el jugo se coagulan, estas aportan a la panela características no deseadas. Para removerlos se adiciona un floculante que los une formando la cachaza, la cual se retira manualmente (Prada, García, & Chaves, 2015).

Para el proceso de clarificación no se añade floculante al jugo por lo que en el proceso de calentamiento dicha cachaza no se elimina totalmente, este no se sedimenta sigue mezclado en las mieles por lo que no se obtiene la composición adecuada del residuo.

4.2. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO

Para la modelación del proceso se realizaron balances de masa con reacción química para el reactor estequiométrico, donde se producirá el biogás por medio de la estequiometría de los componentes que conforman la composición físico.-química de la cachaza y se utilizó como base la Ecuación 1 mencionada en los modelos fenomenológicos en la fundamentación teórica que muestra la ecuación general de balance de materia para la modelación del proceso.

4.2.1. MODELO DE SIMULACIÓN (REACCIONES ESTEQUIOMÉTRICAS)

Las reacciones químicas consisten básicamente en transformar compuesto complejos en compuestos más simples, ocurre durante la descomposición de la materia orgánica contenida en los residuos. A partir de la ecuación general de balance de masa (Ec 1) y del conocimiento de la composición de los residuos que consiste en una gran variedad de compuestos orgánicos, la mayoría de los cuales pueden clasificarse en poli y oligo sacáridos, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga, alcoholes y Fitosteroles; se ha generado diferentes ecuaciones estequiométricas representadas en la Tabla 4 y el Anexo 5.

Tabla 4 Ecuaciones estequiométricas con reacción química

Componente	Reacción química
Oligosacárido	
Sacarosa	$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 6CH_4 + 6CO_2$
Polisacáridos	
Hemicelulosa	$C_{421}H_{810}O_{405} + 16H_2O \rightarrow 210,5CH_4 + 210,5CO_2$
Celulosa	$C_{240}H_{400}O_{200} + 40H_2O \rightarrow 120CH_4 + 120CO_2$
Polímeros fenólicos reticulados	
Lignina	$C_{9,94}H_{11,72}O_{4,17} + 4,93H_2O \rightarrow 5,39CH_4 + 4,55CO_2$
Aminoácidos	
Ácido aspártico	$C_4H_7O_4N + H_2O \rightarrow 1,5CH_4 + NH_3 + 2,5CO_2$
Ácidos grasos	
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2 + 9H_2O \rightarrow 12,5CH_4 + 5,5CO_2$
Alcoholes alifáticos primarios superiores	
N-tetracosanol	$C_{24}H_{50}O + 11H_2O \rightarrow 18CH_4 + 6CO_2$
Fitosteroles o esteroides de origen vegetal	
Estigmasterol	$C_{29}H_{48}O + 16,5H_2O \rightarrow 20,5CH_4 + 8,75CO_2$

4.3. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

La simulación del esquema tecnológico para la predicción de la producción de biogás se seleccionó a partir de (Rojas & Mendoza, 2013) usando el software *CHEMCAD 6.3.1*,

herramienta que facilita los cálculos de balance de masa en un reactor estequiométrico. Se estableció un esquema tecnológico del proceso para la obtención de biogás como se muestra en la Anexo 2 donde tenemos una corriente de entrada de la cachaza, el reactor, una torre de absorción de sulfuro de hidrógeno con entrada de óxido de hierro (III), salidas de biogás, digestato y sulfuro de hierro (III).

4.3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENTRADA

Se recopiló información para ingresar al programa para el desarrollo de modo de operación continua, registro de materiales, corrientes de entrada y salida, construcción del diagrama y procedimientos operacionales (Julián et al., 2018).

4.3.2. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE CACHAZA

Se identificó en la introducción los datos necesarios para el cálculo de la cantidad de cachaza que se produciría diariamente y resolver la ecuación 9. La estimación se realizó en función de la disponibilidad de caña de azúcar y el porcentaje de cachaza extraída.

Tabla 5 Estimación de la capacidad

Componente	Datos
Producción de caña de azúcar (PC):	4500 ha
% de cultivo de caña de azúcar útil (CCU)	90%
Rendimiento estimado de caña (RC)	55 t/ha
% destinado para la producción de panela (PP)	40 %
% de cachaza extraída (CE)	4 %
Días del año (d):	365 días
Cantidad de cachaza tentativa de producción diaria (CCPD)	?

Solución:

$$CCPD = \frac{4\,500 \text{ ha} * 0.90 * 55\text{t/ha} * 0.40 * 0.04}{365 \text{ d}} = 9,76\text{t/d}$$

$$CCPD = 9760 \text{ kg/d}$$

Se empleó los datos de la Tabla 5 y la Ec 10 para estimar la cantidad de cachaza con la que se podría contar, como resultado se cuenta con una disponibilidad representativa de 9760 kg/d de cachaza en la provincia de Pastaza, que se utilizará como flujo para la producción de biogás en la simulación.

4.3.3. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Los parámetros de simulación están directamente relacionados con las condiciones de operación de la tecnología de producción de biogás establecidas en la fundamentación teórica,

la temperatura es un parámetro importante para la digestión anaeróbica, ya que debido a su naturaleza biológica, la tasa de degradación del proceso se ve incrementada con aumentos de la temperatura afectando la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados en el proceso, muy bajas implican tiempos de retención más largos para asegurar el desarrollo del proceso (Rivas, Faith, & Guillén, 2011).

Para el funcionamiento del reactor estequiométrico se estableció la temperatura mesofílica de 25°C puesto que, el proceso mesofílico es más estable para que las bacterias trabajen en forma óptima. Se requiere mantener la temperatura lo más constante posible es decir sin bruscas variaciones durante el día, dado que la temperatura de cada zona es diferente por lo que el rango en el cual trabajamos puede ser alcanzado sin dificultad en diferentes zonas (Decara, Sandoval, & Funes, 2004).

4.3.4. PROCESO DE SIMULACIÓN.

La tecnología de (Rojas & Mendoza, 2013) se simuló a través del software *CHEMCAD 6.3.1* con las capacidades de materias primas diferentes para determinar el punto de equilibrio y la más viable, las ecuaciones estequiométricas de cada uno de los componentes detallados como se muestra en la Tabla 2 y 3 al igual que las diferentes composiciones de la cachaza como se muestra en el Anexo 4.

La cantidad de cachaza calculada en la provincia está en función de las hectáreas cultivadas, % destinado para panela, el rendimiento de caña de azúcar en tonelada por cada hectárea y el porcentaje de cachaza extraída, la cantidad de cachaza tentativa de producción diaria es de 9760 kg/d, pero se simuló desde 976 kg/d ya que las producciones están propensas a fluctuaciones, en esta producción tendría una fluctuación del 10%.

4.3.5. CASO BASE DE PRODUCCIÓN SEGÚN LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Según (Hermida & Lopez, 2003; Ochoa et al., 2010) se refirieron a una producción de metano de 120 m³ por tonelada de cachaza procesada. Al igual que (Valdés, 2015) quien manifiesta que la cachaza bajo un tratamiento anaeróbico puede producir alrededor de unos 130 a 155 m³ de biogás por tonelada de cachaza.

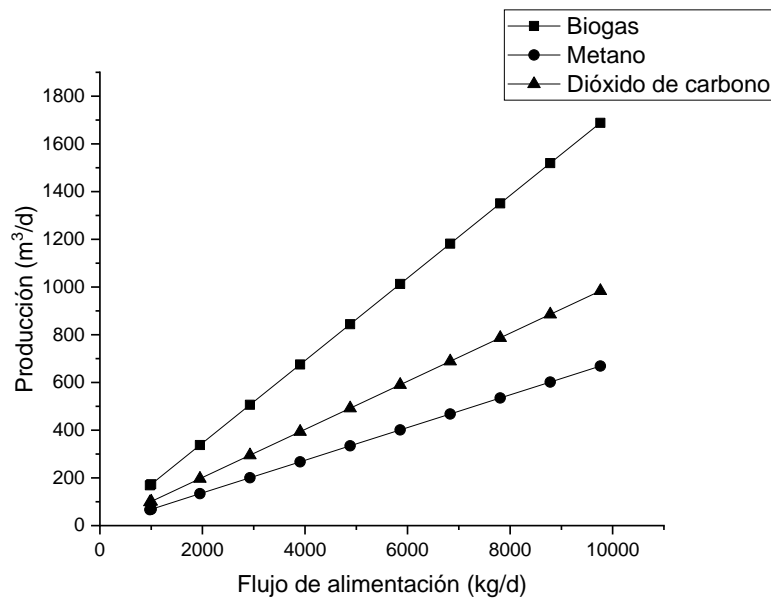
Los resultados de la predicción de producción de biogás como se muestra en la figura 3 (A) para el flujo de alimentación de 1000 kg/d (1 t/d), en condiciones ideales durante la simulación fue de 172,98 m³ de biogás por tonelada de cachaza. El valor obtenido se aproxima a lo establecido anteriormente ya que según (Bernal et al., 2017) la composición de la cachaza varía

por las características agroecológicas del área, con el cultivo cosechado, la eficiencia de la fábrica, el método de clarificación utilizado, entre otros factores.

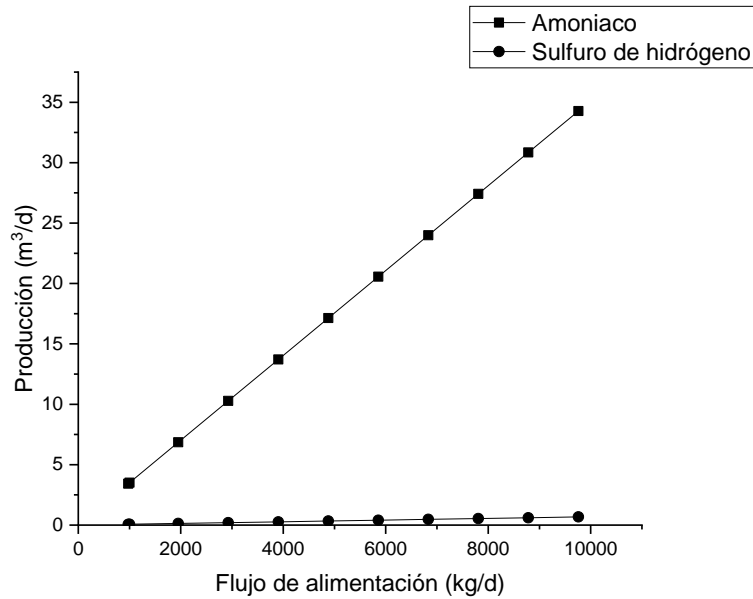
4.3.5.1. CASO BASE CON EL FLUJO DE PRODUCCIÓN EN PASTAZA

El flujo de 9760 kg/d se simuló en el programa *CHEMCAD 6.3.1* en unidades de kg/d en conjunto con la composición y estequiometría de la cachaza. Se realizó fluctuaciones entorno al flujo del 10% como se muestra en el Anexo 3 para, mediante la figura 3 A y B observar como varia la disponibilidad de cachaza y la producción de biogás, metano, dióxido de carbono, amoniaco y sulfuro de hidrogeno.

Con este conocimiento se podrá modificar el flujo en dependencia de la disponibilidad y así predecir cuanto de biogás se podrá obtener en diferentes escenarios.



(A)



(B)

Figura 2 (A) Producción de biogás, metano y dióxido de carbono, (B) Producción de amoniaco y sulfuro de hidrógeno

La figura 3 (A) muestra como la producción de biogás aumenta al incrementar el flujo de alimentación, también se observa la composición del biogás que se constituye de metano, dióxido de carbono; en la figura 3 (B) al amoniaco y el sulfuro de hidrógeno que son parte de la composición del metano.

Según (Cepero et al., 2012; L. Magaña et al., 2006; Siefers et al., 2010) dentro de la composición química del biogás tenemos los componentes de CH_4 entre 40 - 70% en volumen, entre el 30 - 60% en volumen de CO_2 y menos del 7% de otros, la producción que obtuvimos como resultado de la simulación en torno al promedio de la composición base fue de un 39,6% de CH_4 , un 58,3% de CO_2 , el amoniaco 2,03% y sulfuro de hidrógeno 0,04%.

En términos de calidad cuanto menor sea el porcentaje de CO_2 en la mezcla, mejor combustión y mayor poder calorífico se logrará, ya que el CO_2 no aporta poder calorífico, sino que actúa de moderador bajando la temperatura y el rendimiento de la combustión (Martina et al., 2005). Los resultados del CO_2 se encuentra en mayor porcentaje en la composición de biogás según (Gálvez et al., 2000; Varnero, 2011) se debe a que la cachaza contiene fitosteroles que son alcoholes de origen que durante la oxidación anaerobia de los alcoholes estos generan mayor cantidad de CO_2 .

Para utilizar este biogás debemos disminuir la cantidad de CO_2 en una etapa posterior, puesto que según (Appels, Baeyens, Degrève, & Dewil, 2008; Rojas & Mendoza, 2013) el biogás

requiere remoción del CO₂ cuando se lo utiliza como combustible del vehículo, rejilla de gas y para la producción de energía eléctrica; para el caso de calentador a gas, calor y potencia combinados no es necesario la remoción de CO₂.

4.4. CONDICIONES DE CONTORNO AL MODELO PLANTEADO

Para las condiciones del comportamiento del modelo se han establecido los límites tanto inferior como superior de la composición de la cachaza como lo muestra la Tabla 6.

Tabla 6 Composición de cachaza: Límites inferior y superior

COMPOSICIÓN DE LA CACHAZA		
Componentes	Base seca %	
	Lim. Inf.	Lim. Sup.
Proteína cruda	3,81	4,68
Lípidos	3,22	4,1
Ceniza	2,34	3,51
Sacarosa	2,93	4,1
Fibra	4,98	7,32
Otros	7,61	9,96

La cantidad de biogás obtenida está en función de la capacidad de cachaza que se puede obtener para generación, también se obtuvo diferentes composiciones de biogás como se muestra en el Anexo 4 que detalla cada una en de los componentes en torno a los límites tanto superiores como inferiores.

Los resultados de las condiciones del comportamiento del modelo se muestran en el Anexo 5 y 6 donde se puede apreciar el comportamiento para el caso de la producción de biogás, en la figura 4 se muestra el cambio de las condiciones y como aumenta la cantidad de biogás o disminuye si cambiamos la composición y aumentamos el flujo de producción.

Comparando los resultados de cada composición se determinó que en torno a la composición 6 se logró obtener mayor cantidad de biogás con un volumen de 1736,40 m³/d para el flujo de alimentación de 9760 kg/d, para esta composición se escogió el límite inferior de la cantidad de fibra presente en la cachaza y el límite superior de la cantidad de alcoholes, teniendo como resultados mayor cantidad de biogás.

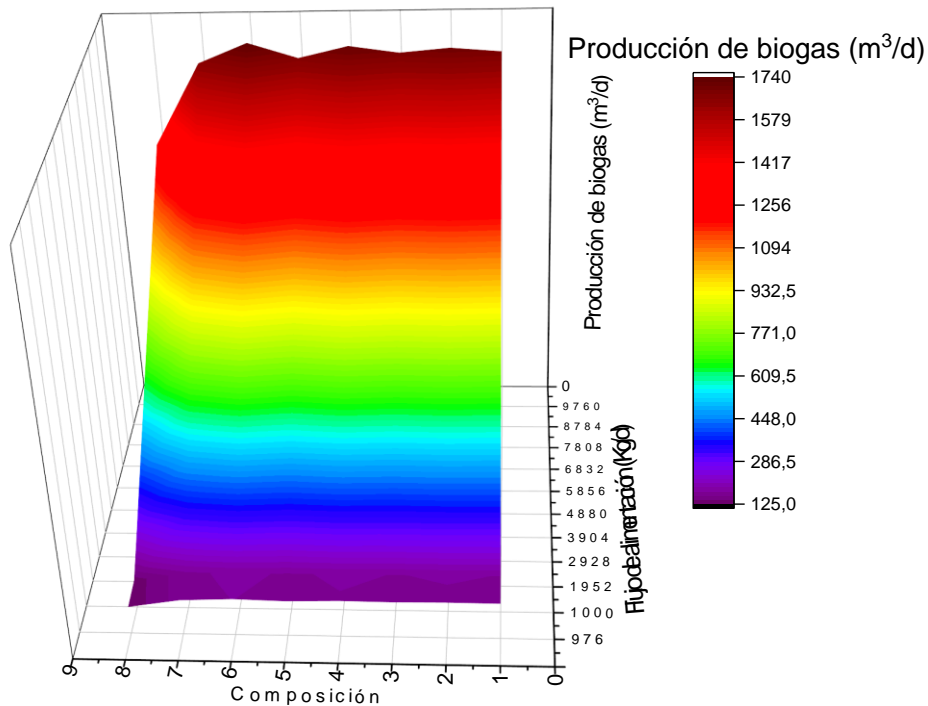


Figura 3 Producción de Biogás

En el caso de la composición del biogás se observa en la Figura 5 como el dióxido de carbono se encuentra en mayor cantidad en todas las composiciones pero tiene un ligero aumento tanto en la composición 7 donde se tomó el límite superior de la cantidad de alcoholes presentes en la cachaza como en la 8 que es la composición de la cachaza en Pastaza.

El metano tiende a disminuir significativamente pero aumenta en la composición 6 obteniendo como resultado una mejor calidad del biogás (metano 40,7%, dióxido de carbono 57,2% y sulfuro de hidrogeno 0,12%), en comparación de las demás composiciones.

Para el sulfuro de hidrógeno durante todas las composiciones se observa una similitud significativa en cada uno de los resultados, para el caso de la composición de la cachaza en Pastaza hay una disminución en relación a las demás ya que la cantidad de proteína es baja y por ende los aminoácidos que contienen azufre.

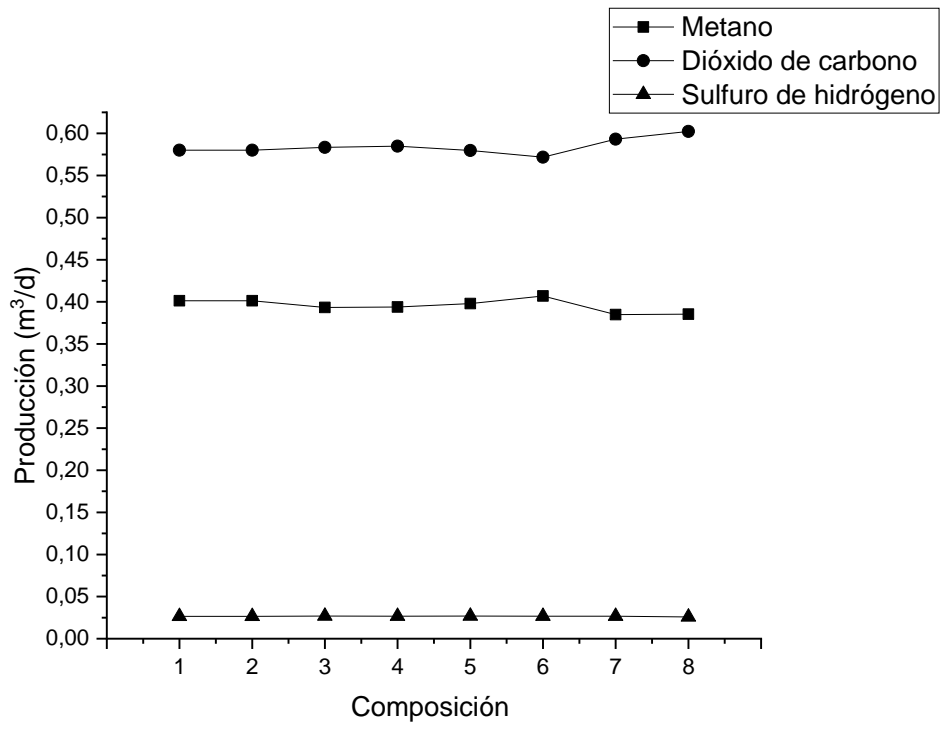


Figura 4 Composición del biogás (metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. La simulación el proceso de digestión anaerobia estequiométrica se obtuvo para un flujo de 9760 kg/d de cachaza un valor de 1288,62 a 1736,40 m³/d de volumen de biogás con una composición de CH₄ 38,53 - 40,7%, CO₂ 57,2 - 60,23%, H₂S 0,0243 - 0,12% y NH₃ 1,22 - 2,01% del volumen. Para estas características de composición la cantidad de CO₂ se encuentra en mayor porcentaje por el contenido de alcoholes, como uso principal se podría utilizar para red de gas en aplicaciones tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores y uso doméstico ya que para otros usos es necesario realizar un tratamiento posterior.

2. La cachaza es un residuo con un potencial energético para la producción de metano por su contenido orgánico, desde el punto de vista bibliográfico y experimental se determinó su composición para el desarrollo del modelo. La cachaza de Pastaza posee valores bajos ya que durante el proceso de producción de panela no se añade floculante al jugo mezclándose la cachaza con las mieles, la muestra tomada es del sobrenadante el cual no tiene las características adecuadas de la composición del residuo.

3. Se realizó la modelación del proceso de producción de biogás en base a la composición de la cachaza y las reacciones estequiométricas para obtener biogás, CH₄, CO₂, NH₃ y H₂S, y de esta forma predecir qué cantidad se puede obtener.

4. La mayor producción y calidad de biogás se obtuvo en la composición 6, con un valor de 1736,40 m³/d para el flujo de alimentación de 9760 kg/d de cachaza y una composición de CH₄ un 40,7%, CO₂ un 57,2%, H₂S un 0,12% y NH₃ 2,01% del volumen a partir de 8 condiciones de contorno para la composición y 11 para el flujo de alimentación.

5.2. RECOMENDACIONES

1. Que se valide experimentalmente los resultados de la simulación para las condiciones de la cachaza de las paneleras de Pastaza y así aprovechar este residuo.

2. Que se realicen estudios para la determinación de la mezcla de otros residuos con la cachaza para obtener la composición con la cual se obtuvieron la mayor producción de metano.

3. Que se realice el estudio del modelo cinético para la producción de biogás y la modelación con las reacciones estequiométricas del proceso de producción de biogás y biol de forma combinada.
4. Que se realicen estudios posteriores aplicando la metodología del trabajo para otros subproductos obtenidos en la producción de la panela y de otros residuos que se generan en la provincia.

CAPÍTULO VI

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abd, S., Eldrainy, Y., & Attia, A. (2016). Utilization of aspen hysys simulation to determine the optimum absorber working pressure needed to achieve more than 0.99 methane purity from egyptian biogas. *Research and Review*, 3, 1739-1744.
- Aguilar, N., Rodríguez, D., & Castillo, A. (2010). Azúcar, coproductos y subproductos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Revista VIRTUALPRO Procesos Industriales*, 106(11), 1-28.
- Alvarez, H., Lamanna, R., Vega, P., & Revollar, S. (2009). Metodología para la obtención de modelos semifísicos de base fenomenológica aplicada a una sulfitadora de jugo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 6(3), 10-20. doi:10.1016/S1697-7912(09)70260-2
- AOAC International. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL* (19 ed.). Gaithersburg.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in energy and combustion science*, 34(6), 755-781. doi:10.1016/j.pecs.2008.06.002
- Arreola, J., Palma, D., Salgado, S., Camacho, W., Obrador, J., Juárez, J., & Pastrana, L. (2004). Evaluación de abono organo-mineral de cachaza en la producción y calidad de la caña de azúcar. *TERRA Latinoamericana*, 22(3), 351-357.
- ASOCAP. (2017). *Agroindustria panelera en la provincia de Pastaza-Ecuador*. Retrieved from Pastaza-Ecuador:
- Basanta, R., Delgado, M., Martínez, J., Vázquez, H., & Vázquez, G. (2007). Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 5(4), 293-305. doi:<https://doi.org/10.1080/11358120709487704>
- Benítez, D., Vargas, J., Torres, V., Soria, S., Rey, S. S., & Navarrete, H. (2015). Herramientas para ordenar la ganadería en la provincia Pastaza de la Amazonia Ecuatoriana. *Livestock Research for Rural Development*, 27(1), 1-13.
- Bernal, R., López, L., Ríos Obregón, J., Jiménez, J., García, Y., & Arteaga, Y. (2017). Thermoalkaline pretreatment influence on anaerobic biodegradability of filter cake for methane production. *MOL2NET*, 3, 1-7. doi:10.3390/mol2net-03-015339
- Berrospe, E., Ordaz, V., Rodríguez, M., & Quintero, R. (2012). Cachaza como sustrato para la producción de plántula de tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(1), 141-156.
- Bohórquez, A., Puentes, Y., & Menjivar, J. (2014). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 73-81.
- Camargo, N., & Williams, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16(34), 142-156.
- Cardona, C., Sánchez, Ó., Ramírez, J., & Alzate, L. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista colombiana de biotecnología*, 6(2), 78-89.
- Cendales, E., & Jiménez, S. (2014). Modelamiento computacional de la producción de energía renovable a partir del biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino. *EAN(77)*, 42-63.
- Cepero, L., Savran, V., Blanco, D., Díaz, M., Suárez, J., & Palacios, A. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 219-226.
- Čučeka, L., Hjalilab, K., Klemešb, J., & Kravanja, Z. (2017). Onion Diagram Implementation to the Synthesis of a Biogas Production Network. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 1687-1692. doi:10.3303/CET1761279

- Decara, L., Sandoval, G., & Funes, C. (2004). *El uso de biodigestores en sistemas caprinos de la provincia de Córdoba.*, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Córdoba (Argentina).
- Diaz, H., Caballero, J., & Diaz, J. (2015). *Simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales y su análisis Técnico-económico-ambiental en la ciudad de Iquitos mediante el uso de Super pro Designer V6* (Bachelor's thesis), Universidad Nacional de La Amazonía Peruana, Perú.
- Ekwonu, M., Perry, S., & Oyedoh, E. (2013). Modelling and Simulation of Gas Engines Using Aspen HYSYS. *Journal of Engineering Science and Technology*, 6(3), 1-4.
- Ersahin, M., Gomec, C., Dereli, R., Arikan, O., & Ozturk, I. (2010). Biomethane production as an alternative bioenergy source from codigesters treating municipal sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Journal of BioMed Research*, 8. doi:10.1155/2011/953065
- Escalante, H., Guzmán, C., & Castro, L. (2014). Anaerobic digestion of fique bagasse: an energy alternative. *Dyna*, 81(183), 74-85.
- Fedailaine, M., Moussi, K., Khitous, M., Abada, S., Saber, M., & Tirichine, N. (2015). Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production. *Procedia Computer Science*, 52, 730-737. doi:10.1016/j.procs.2015.05.086
- Fernández, C., Dustet, C., & Chico, C. (2012). Dos aplicaciones de la técnica de análisis de flujos metabólicos. *Revista Cubana de Química*, 24(1), 70-82.
- Forero, F., Fernández, J., & Álvarez, J. (2010). Efecto de diferentes dosis de cachaza en el cultivo de maíz (*Zea mays*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(1), 77-86.
- Gálvez, L., Cabello, A., & Villamil, G. (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. La Habana: ICIDCA.
- García, C., Montero, G., Coronado, M., & Acosta, M. (2013). Potencial energético de la paja de trigo en el valle de Mexicali. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(3), 67-72.
- García, E., Otero, M., & Rodríguez, D. (2012). Una discreta manera de introducir las ecuaciones con diferencias en la educación secundaria obligatoria. *Revista Sociedad Española de Investigación en Educación Matemática GIDAM*.
- Gómez, L., Amicarelli, A., Alvarez, H., & di Sciascio, F. (2004). *El rol de los modelos en el diseño de equipos de procesos y sistemas de control*. Paper presented at the VI Congreso Nacional de la Asociación Colombiana de Automática.
- González, M., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., & Yañez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235.
- Gopaul, S., & Dutta, A. (2015). Dry reforming of multiple biogas types for syngas production simulated using Aspen Plus: The use of partial oxidation and hydrogen combustion to achieve thermo-neutrality. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(19), 6307-6318. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.03.079
- Gupta, N., Tripathi, S., & Balomajumder, C. (2011). Characterization of pressmud: A sugar industry waste. *Fuel*, 90(1), 389-394. doi:10.1016/j.fuel.2010.08.021
- Hermida, O., & Lopez, L. (2003). Diseño y evaluación de un biodigestor para obtener gas metano a partir de la fermentación de la cachaza. *Centro Azúcar*, 3, 23-29.
- Hernández, H., & Aguirre, J. (2005). Estimación de calidad en polímeros empleando sensores virtuales. *Dyna*, 72(147), 65-73.
- Julián, M., Baltá, J., Pérez, E., & Pérez, A. (2018). Simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto. *Afinidad*, 75(581), 39-44.
- Kabir, M., Rajendran, K., Taherzadeh, M., & Horváth, I. (2015). Experimental and economical evaluation of bioconversion of forest residues to biogas using organosolv pretreatment *Bioresource Technology*, 178, 201-208. doi:10.1016/j.biortech.2014.07.064
- Kwiatkowski, J., McAloon, A., Taylor, F., & Johnston, D. (2006). Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. *Industrial crops and products*, 23(3), 288-296. doi:10.1016/j.indcrop.2005.08.004

- Laines, J., & Sosa, J. (2013). Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula. *Ingeniería*, 17(1), 57-65.
- López, E., Jiménez, J., Romero, O., & Dewulf, J. (2012). Aplicación de la tecnología de digestión anaerobia para tratar residuos sólidos agroindustriales utilizando inóculo de estiércol porcino, en condiciones mesofílicas. *Tecnología Química*, 32(3), 323-329.
- Lorenzo, Y., & Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.
- Lübken, M., Wichern, M., Schlattmann, M., Gronauer, A., & Horn, H. (2007). Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops. *Water Research*, 41(18), 4085-4096. doi:10.1016/j.watres.2007.05.061
- Madrid, C., & Castellanos, Y. (2011). Efecto de activadores sobre la calidad de composts elaborados con cachaza y bagazo de la caña de azúcar. *Venezuelos*, 6(1-2), 22-28.
- Magaña, J., Rubio, R., Jiménez, H., & Martínez, M. (2011). Tratamiento anaerobio de desechos lácticos y estiércol de cabra. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 93-98.
- Magaña, L., Torres, E., Martínez, M., Sandoval, C., & Hernández, R. (2006). Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras. *Acta Universitaria*, 16(2), 27-37.
- Mago, M., Flores, B., & Tovar, L. (2012). Modelación y simulación de un sistema electrógeno funcionado con biogás. *Revista INGENIERÍA UC*, 19(3), 91-101.
- Mantilla, J., Duque, C., & Galeano, C. (2007). Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 133-142.
- Martina, P., Yank, L., Corace, J., Bucki, B., Aeberhard, R., & Ventín, A. (2005). Estudio de la producción de biogas en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor del tipo de carga única o batch. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 9, 23-27.
- Martínez, C., & García, Y. (2016). Use of basic and specific pre-treatments for the biogas production. Revision and analysis. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 81-92. doi:10.13140/RG.2.2.34865.99688
- Martinez, C., Oechsner, H., Brulé, M., & Marañón, E. (2014). Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2), 63-69.
- Martínez, R., Castro, I., & Oliveros, M. (2002). Characterization of products from sugar cane mud. *Revista de la Sociedad Química de México*, 46(1), 64-66.
- Mel, M., Hisham, A., Avicenna, Ihsanb, S., & Setyobudic, R. (2015). Simulation Study for Economic Analysis of Biogas Production from Agricultural Biomass. *Energy Procedia*, 65, 204-214. doi:10.1016/j.egypro.2015.01.026
- Montenegro, K., Rojas, A., Hernández, M., & Rojas, I. (2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *Revista Ion*, 29(2), 23-37. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016002>
- Ochoa, P., Cabello, J., Sagastume, A., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2010). Residue from Sugarcane Juice Filtration (Filter Cake): Energy Use at the Sugar Factory. *Waste and Biomass Valorization*, 1, 407-413. doi:10.1007/s12649-010-9046-2
- Peris, R. (2010). *Biogas process simulation using Aspen Plus* (Master Thesis), Syddansk Universitet.
- Pinos, J., García, J., Peña, L., Rendón, J., González, C., & Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 359-370.
- Pomavilla, S. (2018). *Propuesta de diversificación in silico de la producción de la panela de la provincia de Pastaza*. (Bachelor's thesis), Universidad Estatal Amazónica, Puyo.
- Prada, L., García, H., & Chaves, A. (2015). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. *Revista Corpoica: Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 7-23.

- Quiroz, I., & Pérez, A. (2013). Vinaza y compost de cachaza: efecto en la calidad del suelo cultivado con caña de azúcar. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*(5), 1069-1075.
- Ramón, J., Romero, L., & Simanca, J. (2013). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. *Revista Ambiental agua, aire y suelo*, 1(1), 15-23.
- Ribas, M., Hurtado, R., Garrido, N., Domenech, F., & Sabadí, R. (2011). Metodología para la modelación matemática de procesos. Caso de estudio, fermentación alcohólica. *ICIDCA*, 45(1), 37-47.
- Rincón, M., Rincón, N., Mata, J., & Chirinos, I. (2014). Biodegradabilidad de residuos de alimentos preparados bajo condiciones mesofílicas y termofílicas utilizando un reactor anaeróbico de mezcla completa. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 29-48.
- Rivas, O., Faith, M., & Guillén, R. (2011). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Revista Tecnología en Marcha*, 23(1), 39-46.
- Rivera, V., Aranda, J., Espinosa, T., Robles, F., & Toledo, J. (2009). El Modelo de Digestión Anaeróbica IWA-ADM1: una revisión de su evolución. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 109-118. doi:10.5154/r.inagbi.2010.01.001
- Rodrigo, M. (2016). *BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU*. (Master Thesis), Universitat Politècnica de València.
- Rohstoffe, N. (2010). Guía sobre el biogás desde la producción hasta el uso.
- Rojas, R., & Mendoza, L. (2013). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción+ Limpia*, 7(2), 74-94.
- Rosenberg, L., & Kornelius, G. (2017). Experimental investigation of biogas production from feedlot cattle manure. *Journal of Energy in Southern Africa*, 28(4), 1-8.
- Sablón, N., Pérez, M., Acevedo, J., Chacón, E., & Villalba, V. (2016). La integración en la cadena agroalimentaria de panela en el Puyo-Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 128-135. doi:10.13140/RG.2.2.29471.56480
- SaleheIn, M., Yeasmin, S., Kumer, P., Ahsan, M., Rahman, Z., & Kumer, R. (2012). Chemical Studies on Press Mud: A Sugar Industries Waste in Bangladesh. *Sugar Tech*, 14(2), 109-118. doi:10.1007/s12355-012-0139-z
- Sánchez, A., Rivera, C., & Murrillo, E. (2010). Perspectivas de uso de subproductos agroindustriales para la producción de bioetanol. *Scientia et Technica*, 17(46), 232-235.
- Shafiei, M., Kabir, M., Zilouei, H., Horváth, I., & Karimi, K. (2013). Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment. *Bioresource Technology*, 148, 53-60.
- Shao, P., Dal, M., Kumar, A., Li, H., & Singh, D. (2012). Design and economics of a hybrid membrane-temperature swing adsorption process for upgrading biogas. *Journal of membrane science*, 413, 17-28. doi:10.1016/j.memsci.2012.02.040
- Siefers, A., Wang, N., Sindt, A., Dunn, J., McElvogue, J., Evans, E., & Ellis, T. (2010). A novel and cost-effective hydrogen sulfide removal technology using tire derived rubber particles. *Proceedings of the Water Environment Federation*(12), 4597-4622.
- Silva, F., Nadais, H., Prates, A., Arroja, L., & Capela, I. (2009). Modelling of anaerobic treatment of evaporator condensate (EC) from a sulphite pulp mill using the IWA anaerobic digestion model no. 1 (ADM1). *Chemical Engineering Journal*, 148, 319-326.
- Toselli, L., Guerrero, M., Monesterolo, V., & Beltrán, R. (2009). Aplicación del Simulador ChemCAD TMen la Enseñanza en Carreras de Ingeniería. *Formación universitaria*, 2(3), 19-24.
- Valdés, A. (2015). *Residuos azucareros como fuente de combustible para la generación eléctrica*. Paper presented at the Congreso Iberoamericano sobre microrredes de generación distribuida de renovables.
- Varnero, M. (2011). *Manual de biogas*. Santiago de Chile: FAO.

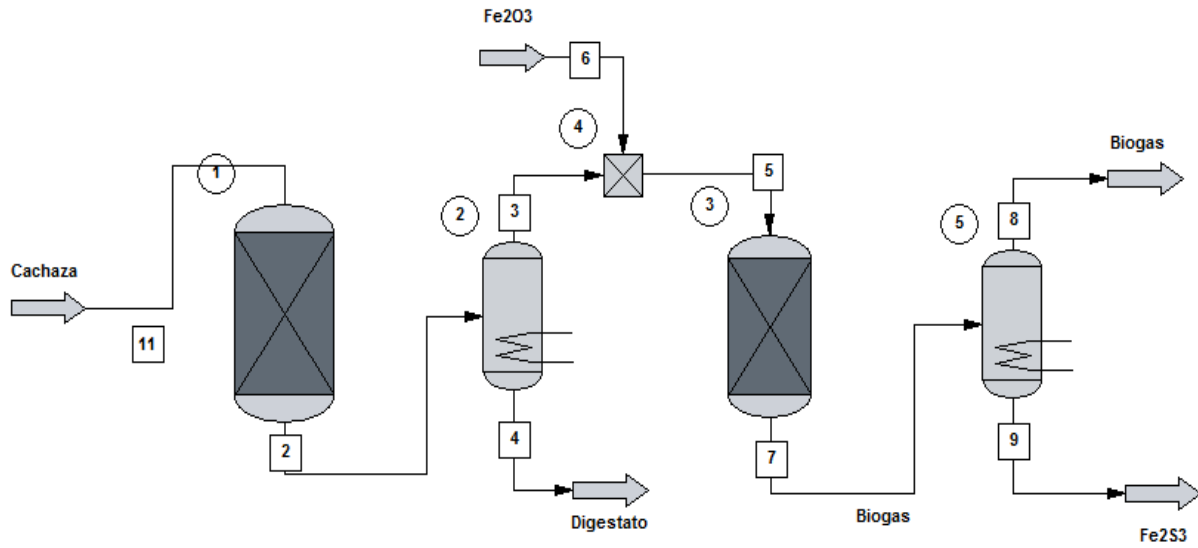
- Yepes, S., Montoya, L., & Orozco, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales frutas en medellín y el sur del valle del aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4422-4431.
- Zhao, B., Yue, Z., Ni, B., Mu, Y., Yu, H., & Harada, H. (2009). Modeling anaerobic digestion of aquatic plants by rumen cultures: Cattail as an example. *Water Research*, 43(7), 2047-2055. doi:10.1016/j.watres.2009.02.006
- Ziemiński, K., & Frąc, M. (2012). Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms. *African Journal of Biotechnology*, 11(18), 4127-4139. doi:10.5897/AJBX11.054
- Zúñiga, V., & Gandini, M. (2013). Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol *Dyna*, 80(177), 124-131.

ANEXOS

Anexo 1 Ecuaciones estequiométricas con reacción química

Componente	Reacción química
Aminoácidos	
Treonina	$C_4H_9O_3N + H_2O \rightarrow 2CH_4 + NH_3 + 2CO_2$
Ácido glutámico	$C_5H_9O_4N + 1,5H_2O \rightarrow 2,25CH_4 + NH_3 + 2,75CO_2$
Alanina	$C_3H_7O_2N + H_2O \rightarrow 1,5CH_4 + NH_3 + 1,5CO_2$
Valina	$C_5H_{11}O_2N + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + NH_3 + 2CO_2$
Metionina	$C_5H_{11}O_2NS + 2,5H_2O \rightarrow 2,75CH_4 + NH_3 + H_2S + 2,25CO_2$
Isoleucina	$C_6H_{13}O_2N + 2,5H_2O \rightarrow 3,75CH_4 + NH_3 + 2,25CO_2$
Leucina	$C_6H_{13}O_2N + 2,5H_2O \rightarrow 3,75CH_4 + NH_3 + 2,25CO_2$
Tirosina	$C_9H_{11}O_3N + 5,5H_2O \rightarrow 4,75CH_4 + NH_3 + 4,25CO_2$
Fenilalanina	$C_9H_{11}O_2N + 6H_2O \rightarrow 5CH_4 + NH_3 + 4CO_2$
Histidina	$C_6H_9O_2N_3 + 5H_2O \rightarrow 2,5CH_4 + 3NH_3 + 3,5CO_2$
Lisina	$C_6H_{14}O_2N_2 + 3H_2O \rightarrow 3,5CH_4 + 2NH_3 + 2,5CO_2$
Arginina	$C_6H_{14}O_2N_4 + 4,5H_2O \rightarrow 2,75CH_4 + 4NH_3 + 3,25CO_2$
Triptofano	$C_{11}H_{12}O_2N_2 + 8,5H_2O \rightarrow 5,75CH_4 + 2NH_3 + 5,25CO_2$
Ácidos grasos	
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2 + 8,5H_2O \rightarrow 12,75CH_4 + 5,25CO_2$
Ácido linolénico	$C_{18}H_{30}O_2 + 9,5H_2O \rightarrow 12,25CH_4 + 5,75CO_2$
Ácido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2 + 8H_2O \rightarrow 13CH_4 + 5CO_2$
Ácido palmítico	$C_{16}H_{32}O_2 + 7H_2O \rightarrow 11,5CH_4 + 4,5CO_2$
Ácido mirístico	$C_{14}H_{28}O_2 + 6H_2O \rightarrow 10CH_4 + 4CO_2$
Ácido araquidónico	$C_{20}H_{32}O_2 + 11H_2O \rightarrow 13,5CH_4 + 6,5CO_2$
Ácido n-tetracosanoico	$C_{24}H_{48}O_2 + 11H_2O \rightarrow 17,5CH_4 + 7,5CO_2$
Ácido n-hexacosanoico	$C_{26}H_{52}O_2 + 12H_2O \rightarrow 19CH_4 + 7CO_2$
Ácido n-octacosanoico	$C_{28}H_{56}O_2 + 13H_2O \rightarrow 20,5CH_4 + 7,5CO_2$
Ácido n-nonacosanoico	$C_{29}H_{58}O_2 + 13,5H_2O \rightarrow 21,25CH_4 + 7,75CO_2$
Ácido n-triacontanoico	$C_{30}H_{60}O_2 + 14H_2O \rightarrow 22CH_4 + 8CO_2$
Ácido n-dotriacontanoico	$C_{32}H_{64}O_2 + 15H_2O \rightarrow 23,5CH_4 + 8,5CO_2$
Ácido n-tetratriacontanoico	$C_{34}H_{68}O_2 + 16H_2O \rightarrow 25CH_4 + 9CO_2$
Alcoholes alifáticos primarios superiores	
N-hexacosanol	$C_{26}H_{54}O + 12H_2O \rightarrow 19,5CH_4 + 6,5CO_2$
N-heptacosanol	$C_{27}H_{56}O + 12,5H_2O \rightarrow 20,25CH_4 + 6,75CO_2$
N-octacosanol	$C_{28}H_{58}O + 13H_2O \rightarrow 21CH_4 + 7CO_2$
N-nonacosanol	$C_{29}H_{60}O + 13,5H_2O \rightarrow 21,75CH_4 + 7,25CO_2$
N-triacontanol	$C_{30}H_{62}O + 14H_2O \rightarrow 22,5CH_4 + 7,5CO_2$
N-dotriacontanol	$C_{32}H_{66}O + 15H_2O \rightarrow 24CH_4 + 8CO_2$
N-tetratriacontanol	$C_{34}H_{70}O + 16H_2O \rightarrow 25,5CH_4 + 8,5CO_2$
Fitosteroles o esteroles de origen vegetal	
Campesterol	$C_{28}H_{48}O_2 + 15H_2O \rightarrow 19,5CH_4 + 8,5CO_2$
β -sitosterol	$C_{29}H_{50}O + 16H_2O \rightarrow 20,5CH_4 + 8,5CO_2$

Anexo 2 Esquema tecnológico para la producción de biogás



Anexo 3 Resultados de la simulación con el flujo de producción de cachaza en Pastaza

FLUJO (Kg/d)	BIOGÁS (m ³ /d)	METANO (m ³ /d)	AMONIACO (m ³ /d)	DIÓXIDO DE CARBONO (m ³ /d)	SULFURO DE HIDRÓGENO (m ³ /d)
9760	1688,34	668,58	34,27	984,13	0,68
8784	1519,51	601,73	30,85	885,72	0,61
7808	1350,67	534,87	27,42	787,31	0,54
6832	1181,84	468,01	23,99	688,89	0,47
5856	1013,01	401,15	20,56	590,48	0,41
4880	844,17	334,29	17,14	492,07	0,34
3904	675,34	267,43	13,71	393,66	0,27
2928	506,5	200,57	10,28	295,24	0,20
1952	337,67	133,72	6,85	196,83	0,14
1000	172,98	68,50	3,51	100,83	0,07
976	168,83	66,86	3,43	98,41	0,07

Anexo 4 Condiciones de contorno para la composición

	Rango		Comp. Base	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. Pastaza
	Lim. Inf.	Lim. Sup.								
Humedad			70,72	70,72	70,72	70,72	70,72	70,72	70,72	77,07
Proteína	3,81	4,68	4,39	3,81	4,68	4,39	4,39	4,39	4,39	2,04
Lípidos	3,22	4,1	3,51	4,10	3,22	3,51	3,51	3,51	3,51	0,38
Ceniza	2,34	3,51	2,93	2,93	2,93	2,34	3,51	2,93	2,93	1,23

Sacarosa	2,93	4,1	3,51	3,51	3,51	4,10	2,93	3,51	3,51	9,26
Fibra	4,98	7,32	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	4,98	7,32	2,03
Otros	7,61	9,96	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	9,96	7,61	8,00

Anexo 5 Resultados de la simulación por composición

Flujo	Producción	Comp. Base	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. Pastaza
976	Biogás	168,83	170,60	168,72	171,82	166,88	173,64	165,05	128,86
	Metano	66,86	68,46	66,37	67,68	66,42	70,65	63,51	49,65
	Dióxido de carbono	98,41	98,95	98,45	100,50	96,74	99,29	97,91	77,61
	Sulfuro de hidrógeno	0,068	0,171	0,22	0,21	0,21	0,208	0,198	0,031
	Amoniaco	3,427249	3,002507	3,68	3,45	3,46	3,49	3,42	1,568
1000	Biogás	172,98	174,79	172,87	176,04	170,98	177,91	169,11	132,03
	Metano	68,50	70,14	68,01	69,34	68,05	72,39	65,07	50,87
	Dióxido de carbono	100,83	101,38	100,87	102,97	99,12	101,73	100,32	79,52
	Sulfuro de hidrógeno	0,069	0,175	0,22	0,21	0,21	0,213	0,203	0,032
	Amoniaco	3,511494	3,076304	3,77	3,53	3,55	3,58	3,50	1,61
1952	Biogás	337,67	341,19	337,44	343,64	333,76	347,28	330,10	257,72
	Metano	133,72	136,92	132,75	135,36	132,84	141,31	127,02	99,30
	Dióxido de carbono	196,83	197,89	196,90	201,00	193,48	198,57	195,82	155,22
	Sulfuro de hidrógeno	0,135	0,341	0,44	0,41	0,41	0,417	0,396	0,062
	Amoniaco	6,854701	6,00	7,36	6,89	6,93	6,98	6,83	3,14
2928	Biogás	506,50	511,79	506,17	515,46	500,64	520,92	495,16	386,59
	Metano	200,57	205,38	199,13	203,04	199,25	211,96	190,54	148,95
	Dióxido de carbono	295,24	296,84	295,35	301,49	290,22	297,86	293,73	232,84
	Sulfuro de hidrógeno	0,203	0,512	0,66	0,62	0,62	0,625	0,594	0,094
	Amoniaco	10,28195	9,01	11,03	10,34	10,39	10,47	10,25	4,70
3904	Biogás	675,34	682,39	674,89	687,28	667,52	694,56	660,21	515,45
	Metano	267,43	273,84	265,50	270,72	265,67	282,62	254,05	198,60
	Dióxido de carbono	393,66	395,79	393,80	401,99	386,96	397,15	391,64	310,46
	Sulfuro de hidrógeno	0,270	0,682	0,88	0,82	0,82	0,833	0,792	0,125
	Amoniaco	13,709402	12,01	14,71	13,79	13,85	13,96	13,67	6,27
4880	Biogás	844,17	852,99	843,61	859,10	834,40	868,20	825,26	644,31
	Metano	334,29	342,30	331,88	338,40	332,09	353,27	317,56	248,25
	Dióxido de carbono	492,07	494,73	492,25	502,49	483,70	496,44	489,54	388,07
	Sulfuro de hidrógeno	0,338	0,853	1,10	1,03	1,03	1,042	0,990	0,156
	Amoniaco	17,136651	15,01	18,39	17,23	17,32	17,45	17,08	7,84
5856	Biogás	1013,01	1023,58	1012,33	1030,92	1001,28	1041,84	990,32	773,17
	Metano	401,15	410,76	398,25	406,08	398,51	423,92	381,08	297,90
	Dióxido de carbono	590,48	593,68	590,69	602,99	580,44	595,72	587,46	465,68
	Sulfuro de hidrógeno	0,405	1,024	1,32	1,24	1,23	1,250	1,188	0,187
	Amoniaco	20,564103	18,02	22,07	20,68	20,78	20,94	20,50	9,41

	Biogás	1181,84	1194,18	1181,06	1202,73	1168,16	1215,48	1155,37	902,04
	Metano	468,01	479,22	464,63	473,76	464,93	494,58	444,59	347,55
6832	Dióxido de carbono	688,89	692,62	689,15	703,48	677,18	695,01	685,37	543,30
	Sulfuro de hidrógeno	0,473	1,194	1,53	1,44	1,44	1,459	1,386	0,219
	Amoniaco	23,991352	21,02	25,75	24,13	24,25	24,43	23,92	10,98
	Biogás	1350,67	1364,78	1349,78	1374,55	1335,04	1389,12	1320,42	1030,90
	Metano	534,87	547,69	531,00	541,44	531,35	565,23	508,10	397,20
7808	Dióxido de carbono	787,31	791,57	787,60	803,97	773,92	794,30	783,27	620,91
	Sulfuro de hidrógeno	0,540	1,365	1,75	1,65	1,64	1,667	1,585	0,250
	Amoniaco	27,418601	24,02	29,43	27,57	27,71	27,92	27,33	12,55
	Biogás	1519,51	1535,38	1518,5	1546,37	1501,92	1562,76	1485,47	1159,76
	Metano	601,73	616,15	597,38	609,12	597,76	635,89	571,61	446,86
8784	Dióxido de carbono	885,72	890,52	886,04	904,47	870,66	893,59	881,18	698,52
	Sulfuro de hidrógeno	0,608	1,535	1,97	1,86	1,85	1,875	1,783	0,281
	Amoniaco	30,846053	27,02	33,10	31,02	31,17	31,41	30,75	14,11
	Biogás	1688,34	1705,97	1687,22	1718,20	1668,80	1736,40	1650,53	1288,62
	Metano	668,58	684,61	663,75	676,80	664,18	706,54	635,12	496,51
9760	Dióxido de carbono	984,13	989,46	984,49	1004,98	967,40	992,87	979,09	776,14
	Sulfuro de hidrógeno	0,675	1,706	2,19	2,06	2,05	2,084	1,981	0,312
	Amoniaco	34,273302	30,03	36,78	34,47	34,64	34,90	34,17	15,68

Anexo 6 Composición del biogás

	Metano	Dióxido de carbono	Sulfuro de hidrógeno
Composición Base	0,4013	0,58	0,001
Composición 2	0,4013	0,58	0,001
Composición 3	0,3934	0,5835	0,001299
Composición 4	0,3939	0,5849	0,0012
Composición 5	0,3980	0,5797	0,00123
Composición 6	0,4069	0,5718	0,0012
Composición 7	0,3848	0,5932	0,0012
Composición real	0,3853	0,6023	0,000243