

**SIMULACIÓN DE RESIDUOS ORGANICOS DERIVADOS DEL CAFÉ PARA
LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR MEDIO DE ASPEN PLUS**

Kenia González Peralta

Facultad de ingeniería, Universidad EAN

Bogotá D.C

2023

1.	Introducción.....	3
2.	Resumen	4
3.	Abstract.....	6
4.	Identificación del problema.....	8
5.	Justificación	10
6.	Antecedentes	12
7.	Objetivo general	14
7.1.	Objetivos específicos	14
8.	Marco teórico.....	15
8.1.	Acerca del café.....	15
8.3.	Aspen Plus.....	16
8.4.	Digestión anaerobia.....	18
8.5.	Residuos de café.....	20
8.5.1.	Caracterización de los residuos de café.....	29
	Análisis composición química	29
8.5.2.	Determinación del potencial de producción de biogás del mucílago de café mediante datos experimentales hallados en bibliografía documentada	30
8.5.3.	32
9.	Metodología	44
9.1.	Cronograma.....	46
	Tabla 5. Elaboración propia.....	47
9.2.	Diseño y modelización del proceso de producción de biogás en Aspen Plus.....	48
9.2.1.	Selección de los equipos y componentes necesarios para el proceso, como reactores, intercambiadores de calor, compresores y separadores	48
9.2.2.	Definición de los flujos de entrada y salida del proceso.....	49
9.2.3.	Modelización detallada de los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis utilizando los modelos de cinética de reacción disponibles en Aspen Plus .	50
9.2.4.	Establecimiento de los parámetros de simulación y validación del modelo con datos experimentales previos.....	55
9.3.	Análisis de sensibilidad y optimización del proceso	60
9.3.1.	Realización de análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que más influyen en la eficiencia del proceso.....	60
9.3.2.	Optimización del proceso mediante la selección de las mejores condiciones operativas para maximizar la producción de biogás y la calidad del mismo.....	61
9.3.3.	Análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación.....	61
10.	Análisis de resultados.....	64
11.	Conclusiones	67
12.	Referencias.....	69

1. Introducción

En los últimos años, ha habido un creciente interés en la producción de biogás a partir de residuos agrícolas como una forma rentable y sostenible de mitigar los efectos del cambio climático. En este sentido, la pulpa de café se ha identificado como un residuo prometedor para la producción de biogás debido a su alto contenido de materia orgánica y su disponibilidad en grandes cantidades en las zonas cafeteras.

Sin embargo, la producción de biogás a partir de la pulpa de café implica una serie de desafíos, como la identificación de las variables clave que afectan la producción de biogás, la selección de las mejores condiciones operativas para maximizar la producción de biogás y la calidad del mismo, y la optimización continua del proceso para garantizar una producción óptima y sostenible.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar los principales pasos necesarios para la producción de biogás a partir de la pulpa de café, incluyendo la identificación de las variables clave, la optimización del proceso a través de ensayos experimentales documentados de estudios anteriores y simulación a través de Aspen Plus, y la evaluación de la calidad del biogás producido.

Se utilizará Aspen Plus para diseñar y modelar el proceso de producción de biogás, seleccionando los equipos necesarios y estableciendo los flujos de entrada y salida. Se modelarán los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis utilizando cinética de reacción en Aspen Plus. Se realizará una optimización del proceso para maximizar la producción de biogás y su calidad, y se analizarán los resultados obtenidos.

2. Resumen

El proceso de producción de biogás a partir de la pulpa de café implica una serie de pasos clave para maximizar la producción y calidad del biogás. Se han realizado investigaciones y simulaciones utilizando herramientas como Aspen Plus para evaluar el rendimiento del proceso. Los resultados obtenidos muestran una eficiencia de conversión de 5409.0 kg/h en una entrada de 10000kg/h en los casos analizados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos datos pueden no ser completamente precisos, ya que las simulaciones se basan en valores teóricos y existen múltiples variables que pueden influir en la eficiencia y los resultados obtenidos.

Es crucial identificar las variables clave que afectan la producción de biogás, como la temperatura, el pH, la relación C/N, la velocidad de agitación y la concentración de sólidos totales. Estas variables deben ser cuidadosamente controladas y ajustadas dentro de rangos óptimos para maximizar la producción de biogás y la calidad del mismo.

Además, se debe realizar un monitoreo continuo del proceso y realizar ajustes según sea necesario para garantizar condiciones óptimas de operación.

Los resultados también resaltan la importancia de evaluar la calidad del biogás producido, especialmente en términos de su contenido de metano y otros componentes. Esto asegura que el biogás cumpla con los estándares requeridos y sea adecuado para su uso posterior, como la generación de energía.

El proceso de producción de biogás a partir de la pulpa de café es una alternativa sostenible y rentable. Los resultados obtenidos muestran que es posible alcanzar una eficiencia de conversión del 50% en las condiciones evaluadas. Sin embargo, se requiere un enfoque cuidadoso y la optimización continua del proceso para maximizar la producción de biogás y garantizar su calidad. La combinación de ensayos

experimentales y herramientas de simulación puede ser de gran ayuda para identificar los parámetros clave y ajustar el proceso de manera adecuada. Esta producción de biogás a partir de la pulpa de café contribuye a la mitigación del cambio climático, la reducción de residuos agrícolas y la generación de ingresos adicionales para los productores de café.

En este trabajo se analizan los principales pasos necesarios para la producción de biogás a partir de la pulpa de café, incluyendo la identificación de las variables clave, la optimización del proceso a través de ensayos experimentales documentados, simulaciones, y la evaluación de la calidad del biogás producido. Se relaciona un procedimiento teórico y simulado basado en las condiciones halladas. Que concluye en que la producción de biogás a partir de la pulpa de café puede tener un impacto significativo en la sostenibilidad ambiental y económica de los productores de café

Palabras clave: Biogás, pulpa de café, digestión anaerobia, simulación, Aspen Plus, producción sostenible.

3. Abstract

The process of biogas production from coffee pulp involves a series of key steps to maximize biogas production and quality. Research and simulations using tools such as Aspen Plus have been conducted to evaluate the process performance. The obtained results show a conversion efficiency of 5409.0 kg/h with a feed rate of 10000 kg/h in the analyzed cases. However, it is important to note that these data may not be completely accurate as simulations are based on theoretical values and there are multiple variables that can influence the efficiency and results obtained.

It is crucial to identify the key variables that affect biogas production, such as temperature, pH, C/N ratio, agitation rate, and total solids concentration. These variables must be carefully controlled and adjusted within optimal ranges to maximize biogas production and quality. Additionally, continuous monitoring of the process and necessary adjustments should be carried out to ensure optimal operating conditions.

The results also highlight the importance of evaluating the quality of the produced biogas, especially in terms of methane content and other components. This ensures that the biogas meets the required standards and is suitable for further use, such as power generation.

The production of biogas from coffee pulp is a sustainable and profitable alternative. The results obtained demonstrate that a conversion efficiency of 50% can be achieved under the evaluated conditions. However, careful attention and continuous optimization of the process are required to maximize biogas production and ensure its quality. The combination of experimental tests and simulation tools can be highly beneficial in identifying key parameters and adjusting the process accordingly. This biogas production from coffee pulp contributes to mitigating climate change, reducing agricultural waste, and generating additional income for coffee producers.

This work analyzes the main steps necessary for biogas production from coffee pulp, including the identification of key variables, process optimization through documented experimental tests, simulations, and evaluation of the produced biogas quality. A theoretical and simulated procedure based on the identified conditions is presented, concluding that biogas production from coffee pulp can have a significant impact on the environmental and economic sustainability of coffee producers.

Keywords: Biogas, coffee pulp, anaerobic digestion, simulation, Aspen Plus, sustainable production.

4. Identificación del problema

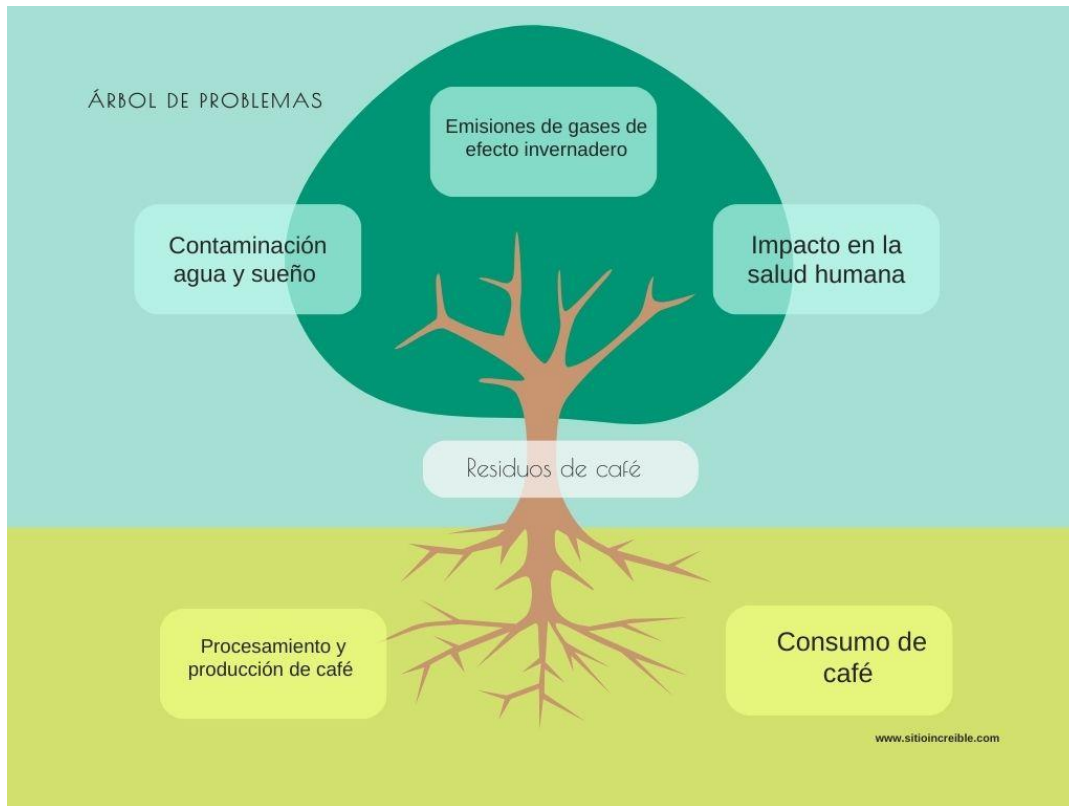


Figura 1: Árbol del problema

Fuente: Elaboración propia

La producción de residuos de café en Colombia se justifica debido a la enorme cantidad de café que se cultiva y procesa en el país. Colombia es uno de los principales productores de café a nivel mundial, y su industria cafetera genera una gran cantidad de subproductos y residuos, como el mucílago, la pulpa y los posos de café. Según estadísticas del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Colombia produjo alrededor de 13.9 millones de sacos de café verde en el año 2020 (DANE, 2021). Dado que cada saco de café verde puede generar aproximadamente 1 tonelada de residuos (ICO, 2015), se puede inferir que la producción de residuos de café en Colombia puede alcanzar varias toneladas al año.

La generación de tales volúmenes de residuos de café puede tener un impacto significativo en el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente. Estos residuos

contienen compuestos orgánicos que, si se descargan sin tratamiento adecuado, pueden contaminar el agua y el suelo, afectando la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos (Calixto et al., 2019). Además, la descomposición de estos residuos puede generar emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático (Mussatto et al., 2011). Por lo tanto, es crucial implementar prácticas de gestión adecuadas, como la valorización de los residuos de café a través de procesos como la producción de biogás, para reducir su impacto ambiental

Los residuos de café representan un desafío ambiental debido a su generación en grandes cantidades y a su potencial impacto negativo en el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente. El mucílago de café, la pulpa, cascara son unos de los principales residuos generados en la producción de café, contiene compuestos orgánicos que pueden contaminar el suelo y el agua si se descargan sin tratamiento. Además, la fermentación de estos residuos puede generar emisiones de gases de efecto invernadero y malos olores.

Según diversos estudios, como el llevado a cabo por Calixto et al. (2019), el manejo inadecuado de los residuos de café puede tener consecuencias negativas, como la contaminación del agua subterránea y la alteración de los ecosistemas acuáticos. Por tanto, es fundamental implementar estrategias de gestión adecuadas para los residuos de café, como la producción de biogás a través de procesos anaeróbicos, que permiten aprovechar energéticamente estos residuos y reducir su impacto ambiental (Mussatto et al., 2011).

5. Justificación

Una de las principales fuentes de actividad económica de varios países, es la actividad agrícola, en un caso particular, se habla de la producción de café especialmente para países en América latina y Asia. Para Colombia en el año 2023, en el mes de enero se exportaron 832 miles de sacos de 60kg, una reducción de lo que fue en diciembre del año 2022, con una exportación de 1035 miles de sacos de 60kg. Estadísticas Cafeteras. (2023)

Los residuos de café pueden parecer inofensivos, sin embargo, su mal manejo puede llegar a ser un problema ambiental y económico. ¿A qué se debe esto?, la pulpa de café contiene grandes cantidades de materia orgánica y nutrientes, estos son altamente contaminantes, y su manejo inadecuado puede causar impactos ambientales negativos, como la contaminación de los suelos y cuerpos de agua. Quinchía-Jaramillo, Y. A., Pérez-Serna, J., Herrera, G. M. D., & Acosta, Y. S. (2019).

Siendo este un problema cotidiano, la implementación de un diseño en el cual se pueda generar biogás a partir de la pulpa de café se presenta como una alternativa a la propuesta de generar energías no convencionales que podrían traer múltiples beneficios.

El biogás es un gas renovable que se obtiene a través de la digestión anaerobia de la materia orgánica, en la que se produce metano y dióxido de carbono. Este gas puede ser utilizado como combustible para generar energía térmica o eléctrica, o como combustible vehicular. ¿Qué es el biogás y cómo se obtiene? (2023). REPSOL

Y es que, principalmente la implementación de este diseño permite aprovechar los residuos orgánicos del café para generar energía renovable y sostenible en forma de biogás, lo que reduciría el uso de fuentes de energía no renovables que contribuyen al cambio climático, siendo este diseño contribuidor a la mitigación de este.

Los combustibles fósiles producen grandes cantidades de CO₂ al ser quemados, liberándolas al aire, esto puede traer grandes consecuencias como lo son problemas respiratorios, asma, cáncer, enfermedades cardíacas, daños al ambiente y a la capa de ozono. S. M. D. (s/f). Climate change and public health. (2023)

Además, el fruto del café está conformado por un 29% de pulpa de café, 12% cascarilla de café, 55% granos de café y de 4% mucílago. Braham, J. E., & Bressani, R. (1978). Pudiendo ser este porcentaje frente al valor de café producido en el año, ya que, este puede variar. La iniciativa de biogás a partir de la pulpa de café como materia prima para este proceso, reduciría los residuos orgánicos, mejorando ecosistemas y reduciendo el impacto ambiental.

La simulación en Aspen Plus para la producción de biogás con pulpa de café, permite comprender y analizar el comportamiento del proceso de producción de biogás, desde la etapa de hidrólisis hasta la etapa de metanogénesis, de manera precisa y detallada es importante porque permite comprender y analizar el proceso de manera detallada, optimizar las condiciones de operación, seleccionar los equipos adecuados y modelar la cinética de las reacciones. Esto conduce a un diseño más eficiente y a una mayor producción de biogás a partir de los residuos de café, contribuyendo así a la maximización de su aprovechamiento energético y la reducción de su impacto ambiental.

Por lo tanto, se promueve por medio de este diseño una alternativa sostenible como un modelo de producción que sea más amigable con el medio ambiente, promoviendo la reducción de residuos y reduciendo la dependencia que se tiene con la quema de combustibles fósiles

6. Antecedentes

En la Universidad tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, Mata Suarez, José Alexander, utilizaron la pulpa de café para la producción de biogás. Su metodología se basó en la obtención de materia prima, adquirida de una finca localizada en la aldea, el montaje de los biodigestores, utilizando dos barriles de polietileno de 55 galones, cada uno con su correspondiente salida de gas, pesaje de la pulpa y preparación de la mezcla, en donde utilizaron diferentes proporciones en cada uno de los biodigestores. Obteniendo resultados de no verse alterada la producción de biogás por la proporción de mezcla. Mata Suarez, J.A. (2022)

Valorización de posos de café para la producción de biogás, bioeconomía circular para una biorrefinería Eyas Mahmoud, AE Atabani e Irfan Badruddinc utilizaron un subproducto del café reciclaron en producto en un proceso conocido como biorrefinería y producir biocombustibles, evitando contaminación y problemas ambientales. Concluyendo que es una opción viable para mantenimiento de vertederos y economía en las operaciones. Eyas Mahmoud, A.E. Atabani, Irfan Anjum Badruddin, (2022)

Codigestión anaerobia de residuos de café y otros sustratos orgánicos, Anastasia Kampiotti^a, Dimitrios Komilis^b obtuvieron resultados de que los residuos de café inhiben la generación de biogás cuando se codigieren y es mejor evitarlo como cosustrato cuando se digieren anaeróbicamente desechos orgánicos. Los residuos de café mejoran el rendimiento del biogás mientras se mantenga en torno al 20 % en la mezcla. Mezclar residuos de café con desechos alimentarios no generan biogás, y mezclarlo con estiércol de vaca genera bajas cantidades de biogás. (2022)

Uso energético del biogás de la digestión anaeróbica de aguas residuales de café en el sur de Minas Gerais, Brasil. Se realizaron análisis fisicoquímicos antes y después de la biodigestión en 4 biodigestores que se mantuvieron a temperatura constante y se

conectaron a un gasómetro, se alimentaron de inóculo y se les ajustó pH, dando para concluir que a sólidos volátiles removidos el contenido de metano es de 11.4%.

Bruno Vasconcelos da Rosa Pin, Regina Mambeli Barros, Electo Eduardo Silva Lora, Oscar Almazán del Olmo, Iban Felipe Silva dos Santos, Eruin Martuscelli Ribeiro, João Víctor de Freitas Rocha (2020)

Optimización de la producción de biogás a partir de residuos de la producción de café.

Este estudio se realizó para investigar los efectos de los pretratamientos químicos en la producción de biogás a partir de desechos de café. Luego de la preparación de una mezcla de residuos de café con una concentración de TS de 10% *p / p*, NL/L con un contenido de metano de casi el 80% *v / v*. *Se concluye que se produce poco biogas en altos contenidos de lignocelulósicos* Un pretratamiento básico favoreció la hidrólisis de la lignina y la celulosa y como resultado de esta se formó en biogás, alto porcentaje de metano. Federico Battista, Débora Fino, Giuseppe Mancini (2016)

7. Objetivo general

Determinar la eficiencia de producción de biogás a partir de biomasa residual de pulpa de café por medio de Aspen Plus

7.1.Objetivos específicos

Identificar variables y sus relaciones requeridas para las entradas del software y determinar la producción de biogás a partir de residuos de pulpa de café.

Diseñar el sistema en donde se evidencien las condiciones de entrada, parámetros de equipos y producción utilizando como materia prima residuos de pulpa de café por medio de Aspen Plus

Definir esquemas de reacción mediante un modelo termodinámico que demuestre lo que sucede y lo que se obtiene de la digestión anaerobia de la producción de biogás a partir de residuos de pulpa de café.

8. Marco teórico

8.1. Acerca del café

Existen varias especies de café, pero las dos especies principales son *Coffea arábica* y *Coffea robusta*. El café se describe y se diferencia de los demás por las diferentes variedades y característica que lo componen, por su cuerpo, aroma, acidez y notas de sabor. La producción de café involucra una serie de procesos, desde la siembra y el cultivo hasta la cosecha y el procesamiento del café verde. El procesamiento del café puede ser seco o húmedo, y los métodos utilizados pueden variar según el país y la región productora de café. El procesamiento del café es un paso crítico en la producción de café, ya que puede afectar significativamente la calidad del café final. El café contiene una variedad de compuestos químicos, incluyendo cafeína, ácidos clorogénicos, lípidos y otros antioxidantes y compuestos fenólicos. Estos compuestos contribuyen al sabor y aroma del café. El café es un cultivo importante para muchos países en términos de exportaciones y generación de ingresos y empleo. Además, el café es a menudo una fuente importante de identidad cultural y patrimonio, y puede desempeñar un papel importante en la construcción de comunidades y el desarrollo rural. Sin embargo, la producción de café también puede presentar desafíos sociales y ambientales, como la pobreza, la deforestación y la contaminación del agua y del suelo. Braham, J. E., & Bressani, R. (1978).

El café forma parte de las bebidas más consumidas por sus características organolépticas. Se conforma de un arbusto tropical de hojas verdes y crece en zonas de humedad moderada a 600 a 1200 metros de altura. Para su cosecha y procesamiento los frutos se retiran de manera manual, o con remezón de las ramas, proceden a ser secadas al sol y así obtener los granos de café. Estos están compuestos de más 1000 sustancias químicas distintos aminoácidos, compuestos nitrogenados, polisacáridos, azúcares, triglicéridos,

ácido linoleico, diterpenos, ácidos volátiles y no volátiles, compuestos fenólicos, cafeína, sustancias volátiles vitaminas y minerales. Gotteland, M., & De Pablo, S. (2007).

8.2. Energías convencionales y no convencionales

En Colombia para el año 2022 se sacó un promedio de lo que un colombiano podría estar generando de CO₂, con un valor de 1.6 toneladas al año, estos principalmente causados por actividades relacionadas con el consumo de energía, agua, transporte, alimentación. De manera individual frente a esta problemática se han incitado a hacer buen uso de los residuos, clasificándolos por colores en las bolsas, ahorrar agua, reducir el plástico y usar bolsas reutilizables, ya que, también se está luchando por la deforestación causada en una tercera parte por la emisión de gases de efecto invernadero. Ministerio de Ambiente y Desarrollo (2022)

El petróleo, gas natural y carbón son energías convencionales desarrolladas a partir de la quema de combustibles fósiles, estos al quemarse liberan el dióxido de carbono y otros gases que son absorbidos por la atmosfera, creando efectos negativos. El uso de energías trae como consecuencia la emisión de CO₂, CH₄ y N₂O. Durante la combustión el CO₂ procede de la oxidación de carbono. El contenido de carbono, generalmente en un proceso perfecto debería convertirse en CO₂, sin embargo, estos procesos no lo son, y terminan generando adicionalmente carbono parcialmente oxidado y no oxidado, esto por la ineficiencia de combustión. Grupo Consultivo de Expertos (GCE)

8.3. Aspen Plus

El artículo “Optimization of biogas upgrading by amine absorption using Aspen Plus simulation” de Bai et al. (2018) se centra en la optimización del proceso de absorción de amina para la purificación de biogás utilizando la herramienta de simulación Aspen Plus.

Los autores describen el modelo de simulación utilizado, que incluye la simulación del proceso de absorción de amina y el proceso de regeneración de la solución de amina. Además, se describe la metodología utilizada para optimizar el proceso de absorción de amina, incluyendo el análisis de sensibilidad y la optimización multiobjetivo. Los resultados muestran que la optimización del proceso de absorción de amina puede mejorar significativamente la eficiencia de purificación del biogás y reducir los costos de operación.

El artículo de López-González y Pérez-Sánchez (2018) presenta una simulación de una planta de biogás a partir de residuos de la industria del café utilizando Aspen Plus. En la metodología, se describe el proceso de digestión anaerobia y se modelan los parámetros necesarios en Aspen Plus, como la cinética de la reacción, la estequiometría y las condiciones operativas. Los resultados muestran que la simulación es capaz de predecir la producción de biogás y metano a partir de los residuos de café con un margen de error aceptable. Los autores concluyen que la simulación en Aspen Plus es una herramienta útil para optimizar el proceso de producción de biogás a partir de residuos de café

El artículo de Pardo-Planas, Viñas y Astals (2016) presenta una simulación del proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café y estiércol de vaca utilizando Aspen Plus. La metodología consistió en obtener datos experimentales de la composición de los residuos y las tasas de producción de biogás y metano, para luego utilizar estos datos en el modelo de simulación de Aspen Plus. Los resultados de la simulación muestran una buena correspondencia con los datos experimentales, y se encontró que la co-digestión mejoró la producción de biogás y metano en comparación con la digestión de los residuos de café solos.

En el artículo presentado por Pérez-Sánchez, M., Martín-Marroquín, J. M., & López-González, L. M. (2019). Muestran la simulación de la producción de biogás a partir de

residuos de la industria del café utilizando el software Aspen Plus®. El estudio se centró en la modelización de un proceso de digestión anaerobia en un reactor de flujo continuo. Se analizaron varios escenarios de operación, incluyendo diferentes cargas orgánicas y temperaturas de operación. Los resultados mostraron que una temperatura óptima de 35°C y una carga orgánica de 2.5 kg COD/m³día proporcionaron la producción máxima de biogás. Los resultados de la simulación fueron validados con datos experimentales previos y se encontró una buena concordancia entre ambos.

8.4.Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es básicamente la fermentación microbiana que, en ausencia del oxígeno, permite una mezcla de gases conocida como biogás. Cualquier materia prima con alto contenido de humedad puede ser utilizada para esta operación, preferiblemente residuos orgánicos por su alta concentración de materia orgánica, que se puede descomponer por microorganismos. Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005).

El artículo presenta el modelo de digestión anaerobia ADM1 desarrollado por la Asociación Internacional del Agua (IWA) para predecir y optimizar el proceso de digestión anaerobia. El modelo ADM1 es un modelo matemático que describe las reacciones bioquímicas y la cinética del proceso de digestión anaerobia, y es ampliamente utilizado en la investigación y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos. El artículo también proporciona una descripción detallada de las variables y parámetros que influyen en el proceso de digestión anaerobia entre ellos las características del sustrato, tipos de microorganismos, pH, alcalinidad, temperatura, tiempo de detención hidráulico, carga orgánica volumétrica, concentración de sólidos, agitación y toxicidad. Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A. y Sanders, W.T.M. (2002)

En el artículo de Hwu, C.-S., Chiang, C.-F., Huang, C.-C. y Yang, K.-C. (2018) se presenta una revisión sobre la digestión anaerobia de residuos alimentarios, centrándose en las etapas de hidrólisis, acidogénesis y fermentación metanogénica. Se discuten los factores que influyen en cada una de estas etapas, como la composición de los residuos alimentarios, la relación C/N, el pH, la temperatura, la presencia de inhibidores, la carga orgánica, entre otros. Además, se presentan estudios recientes sobre diferentes tecnologías y procesos utilizados para mejorar el rendimiento de la digestión anaerobia de residuos alimentarios, tales como la co-digestión, el pretratamiento, el control del pH y la temperatura, y la utilización de microorganismos específicos

En el artículo de Karim et al. (2005), se evaluó el efecto del modo de mezclado en la digestión anaerobia de residuos animales. Se realizaron experimentos utilizando tres modos de mezclado diferentes: mezclado estático, mezclado intermitente y mezclado continuo. Los resultados mostraron que el modo de mezclado tuvo un efecto significativo en la producción de biogás y la eficiencia de la digestión anaerobia. El mezclado intermitente mostró la mayor producción de biogás, mientras que el mezclado estático resultó en la menor producción de biogás. Los autores concluyeron que el modo de mezclado es un factor importante a considerar en la optimización del proceso de digestión anaerobia de residuos animales.

El artículo de Khalid et al. (2011) se enfoca en la digestión anaerobia como una forma de controlar la contaminación generada por los residuos de la ganadería. En el documento se discute cómo la digestión anaerobia puede ser una alternativa rentable y sostenible para tratar estos residuos y producir biogás, un recurso energético renovable. Además, se revisan los factores que influyen en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, como la relación C/N, la temperatura, el pH, el tamaño de partícula y la carga orgánica. También

se discuten los beneficios ambientales de la digestión anaerobia, como la reducción de los olores y la eliminación de patógenos y contaminantes.

El artículo de Kougias et al. (2017) se enfoca en los desafíos y oportunidades en la digestión anaerobia de biomasa lignocelulósica. Se discuten los problemas comunes que enfrenta la digestión anaerobia de este tipo de biomasa, como la baja accesibilidad de los sustratos, la inhibición del proceso por los productos finales y la dificultad de descomponer los componentes lignocelulósicos. También se presentan algunas estrategias para superar estos desafíos, como el pretratamiento de la biomasa, la co-digestión con otros sustratos y la ingeniería metabólica de los microorganismos. Además, el artículo destaca la importancia de la investigación y el desarrollo para mejorar la eficiencia y la rentabilidad de la digestión anaerobia de biomasa lignocelulósica.

8.5. Residuos de café

Li et al. (2020) analizaron la digestión anaerobia del agua residual del café con una alta carga orgánica. Se evaluó el rendimiento y se realizó un análisis de la comunidad microbiana involucrada en el proceso. El estudio presenta una evaluación integrada de los impactos ambientales y la viabilidad económica de los sistemas agroforestales de café en Etiopía, que es el hogar de algunas de las regiones de cultivo de café más importantes del mundo. Se realizó un análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar los impactos ambientales de los sistemas agroforestales de café en comparación con los sistemas convencionales de monocultivo de café. Los resultados del ACV mostraron que los sistemas agroforestales de café tienen un impacto ambiental menor en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua y uso de energía en comparación con los sistemas convencionales de monocultivo de café. Además, el estudio también evaluó la viabilidad económica de los sistemas agroforestales de café mediante

el análisis de costo-beneficio y la evaluación de la rentabilidad. En general, los resultados del estudio sugieren que los sistemas agroforestales de café pueden ser una opción más sostenible y rentable para la producción de café en Etiopía y en otras regiones similares.

De Souza et al. (2020) realizaron una revisión del tratamiento anaerobio del agua residual del procesamiento del café. El estudio se enfoca en evaluar la capacidad del proceso de digestión anaerobia para tratar las aguas residuales de café y recuperar el metano producido como fuente de energía renovable. Se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando un reactor de digestión anaerobia a escala piloto, alimentado con aguas residuales de café provenientes de una planta de procesamiento de café. Los resultados mostraron que el proceso de digestión anaerobia fue capaz de reducir significativamente la carga orgánica en las aguas residuales de café, con una eficiencia de eliminación de DQO (Demanda Química de Oxígeno) del 84% y una eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos totales del 77%. Además, se produjo una cantidad significativa de metano durante el proceso de digestión, lo que sugiere que la digestión anaerobia de las aguas residuales de café puede ser una fuente viable de biometano. En general, los resultados indican que el proceso de digestión anaerobia puede ser una opción sostenible y rentable para tratar las aguas residuales de café y recuperar el metano producido como fuente de energía renovable

Zapata-Bonilla et al. (2017) estudiaron el potencial del mucílago y la pulpa del café para la producción de biogás en Nicaragua. El estudio se enfoca en evaluar el potencial del mucílago y la pulpa del café para la producción de biogás en Nicaragua, uno de los principales productores de café en América Central. Se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando un reactor de digestión anaerobia para evaluar la producción de biogás a partir del mucílago y la pulpa del café. Los resultados mostraron que tanto el mucílago como la pulpa del café son materiales ricos en energía que pueden ser utilizados

como sustratos para la producción de biogás. El mucílago tuvo un mayor potencial de producción de biogás que la pulpa de café, con un rendimiento máximo de biogás de 0,42 metros cúbicos por kilogramo de materia seca. Además, el estudio encontró que la producción de biogás a partir del mucílago y la pulpa del café puede ser una fuente de energía renovable y sostenible para las comunidades cafetaleras de Nicaragua. En general, los resultados indican que el mucílago y la pulpa del café son materiales con un gran potencial para la producción de biogás en Nicaragua y otros países productores de café en la región.

Sahinkaya et al. (2017) investigaron la co-digestión del agua residual del procesamiento del café y el estiércol de vaca para la producción de biogás. El estudio se enfoca en evaluar la co-digestión de agua residual del procesamiento de café y estiércol de vaca para la producción de biogás en un reactor de digestión anaerobia. El objetivo principal del estudio es evaluar cómo el tiempo de retención hidráulico (HRT, por sus siglas en inglés) afecta la producción de biogás en el proceso de co-digestión. Los resultados mostraron que la co-digestión de agua residual del procesamiento de café y estiércol de vaca puede aumentar significativamente la producción de biogás en comparación con la digestión de cada sustrato por separado. Además, el estudio encontró que la producción de biogás aumentó a medida que se aumentó el tiempo de retención hidráulico. La tasa máxima de producción de biogás se observó a un HRT de 20 días, con una producción máxima de biogás de 0.33 metros cúbicos por kilogramo de sustrato seco. En general, los resultados indican que la co-digestión de agua residual del procesamiento de café y estiércol de vaca puede ser una estrategia efectiva para aumentar la producción de biogás y mejorar la gestión de residuos en las zonas rurales donde se produce café y se crían vacas.

Guevara-Martínez et al. (2016) evaluaron el efecto de la relación inóculo-sustrato en la producción de biogás a partir de la pulpa y el mucílago del café. El estudio se enfoca en

evaluar cómo la relación entre el inóculo y el sustrato afecta la producción de biogás a partir de la pulpa y el mucílago del café. El objetivo principal del estudio es determinar la relación óptima entre el inóculo y el sustrato para maximizar la producción de biogás. Los resultados mostraron que la relación inóculo-sustrato tiene un impacto significativo en la producción de biogás. El estudio encontró que la relación óptima para la producción de biogás a partir de la pulpa del café fue de 1:1, mientras que para el mucílago del café fue de 2:1. Además, el estudio encontró que la producción de biogás se puede mejorar mediante la adición de nutrientes y ajustando el pH. En general, los resultados indican que la relación inóculo-sustrato es un factor crítico en la producción de biogás a partir de la pulpa y el mucílago del café, y que la optimización de esta relación puede mejorar la eficiencia y la rentabilidad del proceso de producción de biogás a partir de estos residuos

Macedo et al. (2015) estudiaron la producción de biogás a partir de la pulpa del café en un experimento. El objetivo del estudio fue cuantificar el potencial de producción de biogás de la pulpa del café y analizar su contenido energético. Para ello, se realizó un experimento de digestión anaerobia con muestras de pulpa de café y se midió la producción de biogás a lo largo del tiempo. Los resultados mostraron que la pulpa del café tiene un alto potencial para la producción de biogás, con una producción máxima de 0,3 metros cúbicos de biogás por kilogramo de pulpa seca. Además, el biogás producido contenía un alto porcentaje de metano, lo que lo hace adecuado para su uso como combustible

Mendoza et al. (2015) investigaron la producción de biogás a partir de la co-digestión de la pulpa y el cascarón del café. El objetivo del estudio fue evaluar la producción de biogás a partir de la co-digestión de la pulpa y el cascarón del café en reactores anaerobios de laboratorio. Además, se evaluó la eficiencia del proceso de co-digestión y se comparó con otros sustratos. Los resultados mostraron que la co-digestión de la pulpa y el cascarón del

café generó una producción de biogás significativamente mayor que la digestión individual de cada sustrato. Además, la eficiencia del proceso de co-digestión fue mayor que la de la digestión de otros sustratos evaluados.

Rojas-Contreras et al. (2015) evaluaron la producción de biogás a partir del agua residual del procesamiento del café utilizando reactores secuenciales anaerobios por lotes. El objetivo del estudio fue evaluar la producción de biogás a partir del agua residual del procesamiento del café y determinar la eficiencia del proceso de digestión en los reactores secuenciales anaerobios por lotes. Los resultados mostraron que la producción de biogás aumentó a medida que se avanzó en los reactores secuenciales anaerobios por lotes. Además, se encontró que el pH y la alcalinidad de los residuos eran factores críticos para el proceso de digestión anaerobia. El estudio sugiere que los reactores secuenciales anaerobios por lotes pueden ser una tecnología efectiva para la producción de biogás a partir del agua residual del procesamiento del café, y que los parámetros de pH y alcalinidad deben ser controlados para mejorar la eficiencia del proceso.

Vargas et al. (2014) compararon la producción de biogás a partir del agua residual del procesamiento del café utilizando digestión anaerobia mesofílica y termofílica. El objetivo del estudio fue comparar la producción de biogás y las características del agua residual del procesamiento del café tratada mediante digestión anaerobia mesofílica y termofílica. Los resultados mostraron que la digestión anaerobia termofílica produjo una mayor cantidad de biogás y una mayor reducción de la carga orgánica que la digestión anaerobia mesofílica. Además, se encontró que la digestión anaerobia termofílica también redujo la concentración de compuestos fenólicos en el agua residual del procesamiento del café. En resumen, el estudio sugiere que la digestión anaerobia termofílica puede ser una tecnología efectiva para el tratamiento del agua residual del procesamiento del café, y que puede producir una mayor cantidad de biogás y reducir la carga orgánica y los

compuestos fenólicos en el agua residual en comparación con la digestión anaerobia mesofílica

López-Ángeles et al. (2014) estudiaron la producción de biogás a partir del cascarón del café utilizando un reactor fijo anaerobio. El objetivo del estudio fue evaluar la eficiencia del reactor fijo anaerobio para la producción de biogás a partir del cascarón del café y determinar las condiciones óptimas de operación. Los resultados mostraron que el reactor fijo anaerobio fue efectivo en la producción de biogás a partir del cascarón del café, con una producción máxima de 0,232 m³/kg de cascarón del café. Además, se encontró que la temperatura óptima para la producción de biogás fue de 37 °C y la relación sustrato-inóculo óptima fue de 3:1. En resumen, el estudio sugiere que el cascarón del café puede ser utilizado como sustrato para la producción de biogás mediante la utilización de un reactor fijo anaerobio y que esta tecnología puede ser una alternativa interesante para mejorar la gestión de los residuos del café y obtener beneficios económicos y energéticos a partir de ellos

Sastry et al. (2014) evaluaron el rendimiento de la digestión anaerobia del agua residual del procesamiento del café utilizando un reactor de manta de lodo anaerobio ascendente. El objetivo del estudio fue evaluar la eficacia del reactor para la eliminación de la carga orgánica presente en el agua residual del procesamiento del café y determinar las condiciones óptimas de operación. Los resultados mostraron que el reactor de manta de lodo anaerobio ascendente fue efectivo en la eliminación de la carga orgánica presente en el agua residual del procesamiento del café, con una eficiencia de remoción de materia orgánica del 90% y una producción de biogás de aproximadamente 0,12 m³ de biogás/kg de DQO. El estudio concluyó que el reactor de manta de lodo anaerobio ascendente puede ser una alternativa prometedora para el tratamiento del agua residual del procesamiento del café y la producción de biogás, y que las condiciones óptimas de operación son una

temperatura de 35 °C, un tiempo de retención hidráulico de 6 días y una relación DQO/Alcalinidad entre 0,2 y 0,3

Fierro et al. (2013) evaluaron el rendimiento de la digestión anaerobia de la pulpa del café y sus parámetros cinéticos. Los investigadores determinaron la tasa de producción de metano y el potencial de producción de metano de la pulpa del café. Además, se analizaron los parámetros cinéticos del proceso de digestión anaerobia, incluyendo la velocidad de reacción y el coeficiente de eficiencia de transferencia de masa. Los resultados mostraron que la pulpa del café tiene un alto potencial para la producción de biogás y que la digestión anaerobia es un proceso efectivo para su tratamiento y aprovechamiento energético.

En su estudio, Fierro et al. (2012) evaluaron el efecto del tiempo de retención hidráulico (TRH) y la carga orgánica en la producción de metano durante la digestión anaerobia del agua residual del procesamiento del café. Los investigadores utilizaron un reactor anaerobio de flujo ascendente con manta de lodo y midieron la producción de biogás y metano durante un período de 120 días. Los resultados mostraron que el TRH y la carga orgánica afectan significativamente la producción de metano y la calidad del efluente. Se encontró que un TRH de 20 días y una carga orgánica de 1.8 g COD/L.d fueron las condiciones óptimas para la producción de metano a partir del agua residual del procesamiento del café. Este estudio demostró que la digestión anaerobia es un proceso efectivo para el tratamiento y la valorización energética del agua residual del procesamiento del café

El estudio de Alves et al. (2012) evaluó la producción de biogás a partir del agua residual del procesamiento del café utilizando un reactor de filtro anaerobio ascendente (UASB) en condiciones mesofílicas. Los resultados mostraron que el reactor UASB logró eliminar el 83% de la DQO y el 85% de los sólidos suspendidos totales del agua residual del café,

produciendo biogás con un contenido de metano de alrededor del 65%. Los autores concluyeron que la digestión anaerobia utilizando un reactor UASB es una opción viable para tratar el agua residual del procesamiento del café y producir biogás renovable

Lara-Cisneros et al. (2012) evaluaron el rendimiento de un sistema anaerobio de dos etapas para el tratamiento del agua residual del procesamiento del café. Se usó un reactor anaerobio de lecho fluidizado seguido de un reactor anaerobio de manta de lodo para el tratamiento de agua residual de café. Los resultados mostraron que la eficiencia de eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) alcanzó el 85% con una carga orgánica volumétrica (OLR) de 6,5 kgDQO/m³-día en el reactor de lecho fluidizado. Además, en el reactor de manta de lodo, la eficiencia de eliminación de DQO alcanzó el 90% con una OLR de 5,5 kgDQO/m³-día. El estudio sugiere que el sistema de dos etapas es efectivo para tratar el agua residual del procesamiento del café y puede ser utilizado para la producción de biogás

López-Ángeles et al. (2011) estudiaron la producción de biogás a partir del agua residual del procesamiento del café utilizando un reactor UASB. Los resultados mostraron que el reactor UASB fue efectivo en la eliminación de la carga orgánica, con una reducción de DQO del 83% y una producción de biogás de 0,31 m³/kg DQO. Además, el estudio encontró que el pH y la alcalinidad fueron parámetros críticos que afectaron la eficiencia del proceso de producción de biogás. En general, los resultados sugieren que el uso de un reactor UASB puede ser una opción viable para el tratamiento del agua residual del procesamiento del café y la producción de biogás.

Hernández-Sancho et al. (2011) investigaron la digestión anaerobia del agua residual del procesamiento del café. Se utilizó un reactor anaerobio de flujo ascendente de manta de lodos (UASB) y se evaluó el rendimiento en términos de remoción de materia orgánica y producción de biogás. Los resultados mostraron una alta eficiencia en la eliminación de

materia orgánica, con una reducción del 85% en la concentración de DQO. Además, se produjo una cantidad significativa de biogás, con una tasa de producción de 0,35 L biogás/g DQO eliminada. El estudio concluyó que la digestión anaerobia es una tecnología viable para el tratamiento del agua residual del procesamiento del café.

8.5.1. Caracterización de los residuos de café

Análisis composición química

La pulpa de café es el material que rodea los granos de café y se desprende durante el proceso de despulpado. Esta pulpa es rica en nutrientes y compuestos bioactivos, lo que la convierte en un recurso valioso para la industria alimentaria y agrícola.

La composición química de la pulpa de café varía según diversos factores, como la variedad de café, el clima, el suelo y las prácticas agrícolas. Sin embargo, en general, la pulpa de café contiene los siguientes componentes:

Se genera un reporte en el cual se logró determinar que la pulpa de café fresco contenía un 85% de agua, 7% de carbohidratos (principalmente glucosa, fructosa y sacarosa), 2% de proteínas, 2% de lípidos y 2% de fibra. Segura-Campos et al. (2019)

Wang et al. (2018) analizaron la composición química de la pulpa de café de seis variedades diferentes de café arábica y encontraron que el contenido de agua varió del 79,8% al 86,4%, el contenido de carbohidratos varió del 9,3% al 23,3%, el contenido de proteínas varió del 0,9% al 3,8%, el contenido de lípidos varió del 0,8% al 2,5% y el contenido de fibra varió del 4,4% al 11,3 %

Se analizó la composición fenólica de la pulpa de café y encontraron que contenía ácido clorogénico, ácido cafeico, catequina, epicatequina y procianidinas. El contenido total de compuestos fenólicos fue de 5,8 mg/g de peso seco de pulpa de café. Ariz et al. (2016)

Ballesteros et al. (2015) analizaron el contenido de ácidos orgánicos en la pulpa de café de tres variedades diferentes y encontraron que el ácido cítrico era el ácido predominante, seguido del ácido málico y el ácido tartárico. El contenido total de ácidos orgánicos varió entre 11,7 y 14,6 g/kg de peso fresco de pulpa de café.

8.5.2. Determinación del potencial de producción de biogás del mucílago de café mediante datos experimentales hallados en bibliografía documentada

Un estudio de González-Pérez et al. (2018) evaluó el potencial de producción de biogás de la pulpa de café en un reactor de digestión anaerobia en México. Los autores realizaron ensayos experimentales con diferentes concentraciones de pulpa de café (5%, 10% y 15% de sólidos totales) y monitorearon la producción de biogás durante 60 días. El pH y la temperatura del reactor se mantuvieron constantes durante todo el período experimental. Los resultados mostraron que la concentración de pulpa de café tenía un efecto significativo en la producción de biogás, alcanzando una producción máxima de 0,415 m³ de biogás por kg de materia orgánica volátil (MOV) para una concentración del 15%. Además, se encontró que el contenido de metano en el biogás producido fue de alrededor del 70%.

De Gisi et al. (2017) evaluaron el potencial de producción de biogás de la pulpa de café y otras fuentes de residuos agroindustriales en Italia. Los autores realizaron ensayos experimentales en un reactor de digestión anaerobia con una concentración del 10% de sólidos totales y monitorearon la producción de biogás durante 30 días. El pH y la temperatura del reactor se mantuvieron constantes durante todo el período experimental. Los resultados mostraron que la producción de biogás de la pulpa de café fue de 0,27 m³ de biogás por kg de sólidos volátiles totales (SVT), con un contenido de metano del 61%. Además, se encontró que la combinación de la pulpa de café con otros residuos agroindustriales, como el bagazo de aceituna y el residuo de destilería de bioetanol, mejoró significativamente la producción de biogás.

Un estudio de Flórez-Gómez et al. (2020) evaluó el potencial de producción de biogás de la pulpa de café en una planta de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Los

autores realizaron ensayos experimentales utilizando un digestor anaerobio de mezcla completa y monitorearon la producción de biogás durante 85 días. El contenido de sólidos totales de la pulpa de café se ajustó a 20% y se utilizó una relación carbono: nitrógeno (C: N) de 20:1. Los resultados mostraron que la producción de biogás fue de 0,65 m³ por kg de sólidos volátiles totales (SVT) y el contenido de metano en el biogás producido fue de alrededor del 62%. Además, se encontró que la adición de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, mejoró la producción de biogás.

Un estudio de Rodríguez et al. (2017) analizaron el potencial de producción de biogás de la pulpa de café en una planta piloto de tratamiento de aguas residuales en Costa Rica. Los autores realizaron ensayos experimentales utilizando un digestor anaerobio de mezcla completa y monitorearon la producción de biogás durante 55 días. El contenido de sólidos totales de la pulpa de café se ajustó a 6,5% y se utilizó una relación C: N de 25:1. Los resultados mostraron que la producción de biogás fue de 0,42 m³ por kg de sólidos volátiles (SV) y el contenido de metano en el biogás producido fue de alrededor del 61%.

Basándonos en los estudios mencionados, se puede concluir que la pulpa de café tiene un potencial para la producción de biogás mediante la utilización de un digestor anaerobio. Los ensayos experimentales muestran que la producción de biogás varía dependiendo de la concentración de sólidos y la relación C: N utilizada, siendo necesario ajustar estas variables para obtener los mejores resultados. Además, se encontró que la adición de nutrientes puede mejorar la producción de biogás. En general, la producción de biogás a partir de la pulpa de café puede ser una opción interesante para el tratamiento de residuos y la generación de energía renovable en países productores de café como lo es Colombia.

. Análisis de la influencia de variables

8.5.3.

La base de esta investigación se centra en datos teóricos hallados en diferentes investigaciones, dentro de las cuales se determinaron las variables más significativas en el proceso de digestión anaerobia.

Temperatura

La temperatura es un factor clave en el proceso de digestión anaerobia, ya que afecta directamente al crecimiento y actividad de los microorganismos involucrados en cada etapa del proceso. Los rangos de temperatura óptimos pueden variar según el sustrato utilizado, la configuración del proceso y las condiciones operativas específicas.

Para la etapa de hidrólisis y acidificación, se ha reportado un rango de temperatura óptimo de 30-40 °C en un estudio de digestión anaerobia de residuos orgánicos alimentarios (Wang et al., 2013). En esta etapa, los microorganismos descomponen los componentes orgánicos complejos presentes en el sustrato y los convierten en compuestos más simples.

En la etapa de acetogénesis, se ha reportado un rango de temperatura óptimo de 35-55 °C en un estudio de digestión anaerobia de residuos de almidón (Gavala et al., 2003). En esta etapa, los compuestos simples producidos en la etapa anterior son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

En la etapa de metanogénesis, se ha reportado un rango de temperatura óptimo de 30-40 °C en un estudio de digestión anaerobia de lodos de depuradora (Angelidaki et al., 2004).

En esta etapa, los microorganismos producen metano y dióxido de carbono a partir del ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono producidos en la etapa anterior.

Para la etapa completa de digestión anaerobia, se ha reportado un rango de temperatura óptimo de 35-55 °C en un estudio de digestión anaerobia de desechos de frutas y verduras

(Jalilzadeh et al., 2019). Esta etapa incluye todas las etapas anteriores y es donde se produce la mayor cantidad de biogás.

Es importante tener en cuenta que estos rangos de temperatura óptimos son solo indicativos y pueden variar según el tipo de sustrato utilizado, la configuración del proceso y las condiciones operativas específicas. Por lo tanto, se recomienda realizar pruebas de laboratorio y ajustar las condiciones operativas del proceso en consecuencia para lograr los mejores resultados en la producción de biogás a partir de la pulpa de café u otros sustratos orgánicos.

Rangos de temperatura óptimos para diferentes etapas de la producción de biogás por digestión anaerobia.

Etapa	Temperatura
Hidrolisis y acidificación	30-40°C
Acetogénesis	35-55°C
Metanogénesis	30-40°C
Digestión anaerobia completa	35-55°C

Tabla 1. Adaptada de varios autores

Potencial de hidrogeno (pH)

El pH es uno de los factores más críticos en el proceso de digestión anaerobia, ya que puede afectar significativamente la actividad de los microorganismos presentes en el sistema. El pH adecuado para la digestión anaerobia puede variar según el tipo de sustrato utilizado y los microorganismos presentes en el sistema. Además, el pH también puede

variar durante el proceso debido a la producción de ácidos orgánicos y alcalinidad en el medio.

Un estudio de digestión anaerobia de residuos de alimentos informó que el rango de pH óptimo para la hidrólisis y acidogénesis fue de 5.5 a 6.5, lo que indica que se necesita un ambiente ácido para la descomposición de la materia orgánica compleja. En cambio, el rango de pH óptimo para la acetogénesis y la metanogénesis fue de 6.8 a 7.5, lo que sugiere que se requiere un ambiente ligeramente alcalino para estas etapas del proceso. (Chen et al., 2008).

En un estudio de digestión anaerobia de lodos de depuradora, se encontró que el rango de pH óptimo para la metanogénesis fue de 6.5 a 7.5. Esto sugiere que la digestión anaerobia de lodos de depuradora puede ser más adecuada en ambientes neutros a ligere. (García-Encina et al., 2000).

Otro estudio de digestión anaerobia de residuos de alimentos informó que el rango de pH óptimo para la digestión completa fue de 7.0 a 8.5. Este amplio rango de pH indica que el proceso de digestión anaerobia de residuos de alimentos puede ser más tolerante a la variación del pH. (Jalilzadeh et al., 2019).

En un estudio de digestión anaerobia de aguas residuales de mataderos, se informó que el rango de pH óptimo para la digestión completa fue de 7.2 a 8.0. Este rango de pH indica que la digestión anaerobia de aguas residuales de mataderos puede ser más adecuada en ambientes ligeramente alcalinos. (Xie et al., 2018).

Es importante destacar que los rangos de pH óptimos son solo indicativos y pueden variar según el tipo de sustrato utilizado, la configuración del proceso y las condiciones operativas específicas. Por lo tanto, se recomienda realizar pruebas de laboratorio y

ajustar las condiciones operativas del proceso en consecuencia para lograr los mejores resultados en la digestión anaerobia.

Rango de pH óptimos para la producción de biogás por digestión anaerobia.

Etapa	pH
Hidrolisis y acidogenesis	5.5 a 6.5
Acetogénesis y metanogénesis	6.8 a 7.5
Metanogénesis	6.5 a 7.5
Digestión completa	7.0 a 8.5
Digestión completa	7.2 a 8.0

Tabla 2. Adaptada de autores

Agitación

Batstone et al. (2002) llevaron a cabo una investigación acerca de la agitación en los procesos de digestión anaerobia y determinaron que una agitación adecuada puede mejorar significativamente la eficiencia de la digestión anaerobia en la etapa de acidificación.

En un estudio de digestión anaerobia de lodos de depuradora, Gavala et al. (2004) evaluaron el efecto de la agitación en el proceso de digestión anaerobia y encontraron que una velocidad de agitación de 50 rpm resultó ser la más adecuada para lograr una alta eficiencia de digestión.

En otro estudio de digestión anaerobia de residuos sólidos municipales, Zhang et al. (2007) evaluaron la influencia de diferentes regímenes de agitación y descubrieron que una velocidad de agitación de 60 rpm mejoró la producción de biogás y redujo el tiempo de retención hidráulico.

Finalmente, en un estudio de digestión anaerobia de desechos de frutas y verduras, Jalilzadeh et al. (2019) evaluaron el efecto de diferentes velocidades de agitación y encontraron que una velocidad de agitación de 150 rpm resultó en una mayor producción de biogás y una mayor eficiencia de digestión.

En general, estos estudios sugieren que una agitación adecuada puede mejorar significativamente la eficiencia de la digestión anaerobia en diferentes tipos de sustratos y procesos.

Poder calorífico

Varios estudios han abordado el tema del poder calorífico en la digestión anaerobia, y sus hallazgos son relevantes para la valorización energética del biogás producido. A continuación, se mencionan algunos ejemplos de autores y estudios relevantes:

Zhang et al. (2007) llevaron a cabo un estudio sobre la digestión anaerobia de residuos sólidos municipales y encontraron que el poder calorífico del biogás producido osciló entre 20.96-22.61 MJ/m³.

En otro estudio, Sun et al. (2014) investigaron el poder calorífico del biogás producido a partir de la digestión anaerobia de lodos de depuradora y hallaron que el poder calorífico del biogás se situó entre 20.45-21.36 MJ/m³.

Dohányos et al. (2013) evaluaron el poder calorífico del biogás producido a partir de la digestión anaerobia de residuos de alimentos y encontraron que el poder calorífico varió entre 19.1 y 21.8 MJ/m³.

En un estudio más reciente, Jalilzadeh et al. (2020) investigaron el poder calorífico del biogás producido a partir de la digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras y encontraron que el poder calorífico varió entre 19.7 y 20.3 MJ/m³.

Estos estudios sugieren que el poder calorífico del biogás producido por la digestión anaerobia puede ser influenciado por diferentes factores, como el tipo de sustrato utilizado y las condiciones operativas del proceso. Asimismo, es importante destacar que el poder calorífico del biogás producido por la digestión anaerobia es un factor crítico a tener en cuenta para la utilización del biogás como fuente de energía renovable.

En general, la evaluación del poder calorífico del biogás producido por la digestión anaerobia puede proporcionar información valiosa sobre la calidad del biogás y su potencial energético.

Rango de poder calorífico de biogás producido por digestión anaerobia.

	CP
Residuos sólidos	20.96-21.61 MJ/m ³
Residuos de alimentos	19.1-21.8 MJ/m ³
Residuos de frutos y verduras	19.7-20.3 MJ/m ³
Lodos de depuradora	20.45-21.36 MJ/m ³

Tabla 3. Adaptada de autores

Inoculación

Angelidaki et al. (1993) realizaron un estudio sobre la inoculación en la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y encontraron que la inoculación con lodo digerido mejoró significativamente la estabilidad del proceso de digestión anaerobia.

En un estudio sobre la digestión anaerobia de residuos de alimentos, Kleyböcker et al. (2012) evaluaron el efecto de diferentes inoculantes y encontraron que la inoculación con lodo digerido mejoró la estabilidad del proceso y la producción de biogás.

En otro estudio, Liu et al. (2015) investigaron la inoculación en la digestión anaerobia de desechos de frutas y verduras y encontraron que la inoculación con lodo digerido mejoró la eficiencia de la digestión anaerobia y redujo el tiempo de retención hidráulico. En un estudio de digestión anaerobia de residuos de jardinería, Zhu et al. (2016) evaluaron el efecto de diferentes inoculantes y encontraron que la inoculación con lodo digerido mejoró significativamente la producción de biogás y la reducción de sólidos volátiles.

En un estudio más reciente, Song et al. (2020) investigaron la inoculación en la digestión anaerobia de residuos de alimentos y encontraron que la inoculación con lodo digerido y estiércol de vaca mejoró la estabilidad del proceso y la producción de biogás.

Estos estudios sugieren que la inoculación con lodo digerido puede mejorar significativamente la estabilidad del proceso y la producción de biogás en diferentes tipos de sustratos y procesos de digestión anaerobia.

Los estudios mencionados indican que la inoculación con lodo digerido es una práctica efectiva para mejorar la estabilidad del proceso y la producción de biogás en la digestión anaerobia de residuos orgánicos. En particular, la inoculación con lodo digerido ha demostrado mejorar la eficiencia del proceso, reducir el tiempo de retención hidráulico, aumentar la producción de biogás, y disminuir la concentración de sólidos volátiles en diferentes tipos de sustratos.

En general, la inoculación con lodo digerido se considera una técnica prometedora para optimizar el proceso de digestión anaerobia y aumentar la producción de biogás a partir de diferentes tipos de residuos orgánicos.

Factores de inhibición

Li et al. (2011) realizaron un estudio sobre los factores de inhibición en la digestión anaerobia de lodos de depuradora y encontraron que los ácidos grasos volátiles (AGV) y la concentración de amonio eran los principales factores de inhibición.

En otro estudio, Kassahun et al. (2017) investigaron los factores de inhibición en la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos y encontraron que la presencia de metales pesados y la alta concentración de nitrógeno y sulfuro eran factores de inhibición importantes.

En un estudio de digestión anaerobia de residuos de alimentos, Liu et al. (2015) evaluaron los efectos de los ácidos grasos volátiles y la concentración de sulfuro en la digestión anaerobia y encontraron que estos factores podían inhibir la actividad microbiana y reducir la producción de biogás.

En un estudio más reciente, Jalilzadeh et al. (2020) investigaron los factores de inhibición en la digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras y encontraron que la alta concentración de ácidos grasos volátiles y la baja relación carbono/nitrógeno eran factores de inhibición importantes.

En general, estos estudios sugieren que la presencia de ciertos compuestos, como los ácidos grasos volátiles, amonio, sulfuro y metales pesados, pueden inhibir la actividad microbiana y reducir la producción de biogás en los procesos de digestión anaerobia. Por lo tanto, es importante controlar cuidadosamente la composición y las condiciones operativas del proceso para minimizar la presencia de estos factores de inhibición

Estos estudios destacan la importancia de controlar cuidadosamente la composición y las condiciones operativas del proceso para minimizar la presencia de factores de inhibición en la digestión anaerobia, como la presencia de ácidos grasos volátiles, amonio, sulfuro y metales pesados. Es esencial identificar y controlar estos factores de inhibición para maximizar la producción de biogás y la eficiencia del proceso. Además, los estudios también destacan la importancia de monitorear regularmente los parámetros del proceso y realizar ajustes necesarios para garantizar el óptimo desempeño del proceso de digestión anaerobia.

Relación carbono nitrógeno

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es un parámetro importante en la digestión anaerobia, ya que puede afectar la estabilidad y la eficiencia del proceso.

Batstone et al. (2002) señalaron que la relación C/N es un factor crítico que puede afectar la producción de biogás y la estabilidad del proceso de digestión anaerobia. Sugirieron que una relación C/N adecuada para la mayoría de los sustratos debe ser superior a 20 y preferiblemente superior a 25.

Liu et al. (2017) realizaron un estudio sobre la digestión anaerobia de lodos de depuradora y encontraron que una relación C/N de 20-30 era óptima para la producción de biogás y la estabilidad del proceso.

En otro estudio, Zhang et al. (2015) investigaron la relación C/N en la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos y encontraron que una relación C/N de 25-30 era óptima para la producción de biogás.

En un estudio más reciente, Chua et al. (2021) evaluaron la relación C/N en la digestión anaerobia de residuos alimentarios y encontraron que una relación C/N de 20-25 era óptima para la producción de biogás y la estabilidad del proceso.

En general, estos estudios sugieren que una relación C/N adecuada es importante para maximizar la producción de biogás y la estabilidad del proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, la relación C/N óptima puede variar según el sustrato y las condiciones de operación del proceso.

Rangos de relación de C/N para la digestión anaerobia para la producción de biogás.

	Relación C/N
Para sustratos	20-25
Para biogás	25-30
Residuos sólidos	25-30
Residuos alimentarios	20-25

Tabla 4. Adaptada de autores.

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es un parámetro clave en la digestión anaerobia y afecta la estabilidad y la eficiencia del proceso. Los estudios mencionados sugieren que una relación C/N adecuada para la mayoría de los sustratos debe estar por encima de 20, preferiblemente por encima de 25, y que una relación C/N de 20-30 es óptima para la producción de biogás y la estabilidad del proceso en algunos sustratos.

Característica de la pulpa de café

La producción de biogás a partir de la pulpa de café es un tema que ha sido investigado por diversos autores.

Rodríguez et al. (2014) realizaron un estudio sobre la producción de biogás a partir de la pulpa de café mediante la digestión anaerobia. Los resultados indicaron que se logró una producción de biogás de hasta 0,5 m³/kg de pulpa de café, con una concentración de metano del 70%.

De Mesquita et al. (2019) investigaron la producción de biogás a partir de la pulpa de café en un digestor anaerobio de flujo ascendente. Los resultados indicaron que se logró una producción de biogás de hasta 0,40 m³/kg de pulpa de café.

Valencia et al. (2020) estudiaron la producción de biogás a partir de la pulpa de café mediante la co-digestión anaerobia con otros residuos orgánicos. Los resultados mostraron que se logró una producción de biogás de hasta 0,64 m³/kg de mezcla de residuos, con una concentración de metano del 53%.

Lora et al. (2019) evaluaron la producción de biogás a partir de la pulpa de café en un sistema de digestión anaerobia en dos fases. Los resultados indicaron que se logró una producción de biogás de hasta 0,28 m³/kg de pulpa de café, con una concentración de metano del 62%.

Estos autores indican que la pulpa de café es un sustrato prometedor para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia. Sin embargo, los resultados pueden variar según las condiciones de operación del proceso, como la relación carbono/nitrógeno, la temperatura, la acidez, la agitación, entre otros. La producción de biogás a partir de la pulpa de café ha sido investigada por varios autores. Según sus estudios, la digestión anaerobia de la pulpa de café puede generar una producción de biogás de hasta 0,5 m³/kg de pulpa de café, dependiendo de las condiciones de operación del proceso. Estos autores han encontrado que la relación carbono/nitrógeno, la temperatura, la acidez, la agitación y otros factores pueden afectar la producción de biogás. También se ha investigado la co-digestión de la pulpa de café con otros residuos orgánicos para aumentar la producción de biogás. En general, estos estudios indican que la pulpa de café puede ser un sustrato prometedor para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia.

9. Metodología

Diseño metodológico

La investigación se cataloga como cuantitativa, ya que se busca realizar una recopilación de datos obtenidos a partir de bases de datos, estudios previos a esta problemática, como la cantidad de biogas generado, la composición del sustrato, la eficiencia de conversión del proceso, entre otros, y a partir de toda la información recolectada se busca dar respuesta a las preguntas de investigación.

Tipo de diseño correlacional

En esta investigación se busca correlacionar el uso de pulpa de café como materia prima principal en un proceso de digestión anaerobia para la obtención de biogás, esto por medio de la simulación que Aspen Plus permite, para obtener resultados que demuestren su viabilidad frente a otros tipos de obtención de energías convencionales.

Recopilación de datos: Recopilar datos sobre las propiedades del café, tales como su composición química, contenido de humedad, densidad, etc. También es necesario obtener información sobre el proceso de digestión anaerobia, como las cinéticas de degradación de los componentes del café, los parámetros operativos del reactor anaerobio, la generación de biogás y la calidad del mismo.

Es importante obtener la información principal, ya que, será el primer pilar de la investigación, Aspen Plus es un programa que empieza a simular a través de entradas iniciales en las cuales se requieren ciertos tipos de parámetros, como las cantidades de materia prima, sus componentes, a la temperatura deseada, flujos y entre otros como el tipo de equipos que se van a realizar.

Modelado del proceso en Aspen Plus: Con base en la información recopilada, se procede a modelar el proceso en Aspen Plus. En primer lugar, se crean los bloques de

flujo de materiales para el residuo de café, el agua y los productos del proceso (biogás, líquido digestado, sólidos residuales, etc.). Luego, se establecen las propiedades físicas y químicas de las corrientes y se definen los parámetros del reactor anaerobio.

Una vez obtenidos los datos principales, se debe tener un diagrama de bloques con lo que será todo el procedimiento que se va a realizar, variables, cantidad de equipos y rectores específicos para realizar la digestión anaerobia.

Selección de modelos de simulación: Se seleccionan los modelos de simulación adecuados para representar las reacciones químicas y biológicas que ocurren en el proceso. En este caso, se pueden utilizar modelos cinéticos de digestión anaerobia para simular la degradación de los componentes del café y la producción de biogás.

Análisis y ajuste del modelo: Se lleva a cabo un análisis del modelo para verificar su validez y precisión en la simulación del proceso. Si es necesario, se ajustan los parámetros del modelo para mejorar su precisión. Obtenidos los resultados se hacen pruebas de las posibilidades que se encuentren a partir de las conclusiones y así ir variando hasta obtener un resultado deseado.

Evaluación del rendimiento del proceso: Se realizan simulaciones para evaluar el rendimiento del proceso de producción de biogás a partir de residuos de café, tales como la cantidad y la calidad del biogás generado, la eficiencia de conversión de la materia orgánica en biogás, la generación de sólidos residuales, etc.

Optimización del proceso: Se realizan simulaciones adicionales para optimizar el proceso y mejorar su eficiencia y rentabilidad. Esto puede implicar ajustar los parámetros del reactor anaerobio, cambiar las condiciones de operación o considerar el uso de tecnologías de separación y purificación del biogás.

Análisis de resultados y conclusiones: Se analizan los resultados de las simulaciones y se llega a conclusiones sobre la viabilidad y la eficiencia del proceso de producción de biogás a partir de residuos de café modelado en Aspen Plus.

9.1. Cronograma

Objetivo	No de tarea	Actividad	Inicio	Finaliza	Duración de la actividad
Identificar variables y sus relaciones requeridas para las entradas del software y determinar la producción de biogás a partir de residuos de pulpa de café.	1	Identificar variables	16/3/2023	20/3/2023	4
	2	Realizar la medición de los parámetros y características iniciales.	20/3/2023	25/3/2023	5
	3	Determinar la producción	25/3/2023	27/3/2023	2
Diseñar el sistema en donde se evidencien las	4	Diseñar diagrama de bloques de todo el procedimiento	16/3/2023	24/3/2023	8

condiciones de entrada, parámetros de equipos y producción	5	Obtener parámetros principales e ir probando la eficiencia de cada uno	16/3/2023	25/3/2023	9
Analizar eficiencias con cambios en las condiciones de entrada, fracción	7	Analizar resultados obtenidos de los cambios de variables e identificar el más eficiente	31/3/2023	8/4/2023	8
en cantidades de entrada y resultados	8	Comparar con resultados teóricos	31/3/2023	8/4/2023	8
Definir esquemas de reacción mediante un modelo termodinámico que demuestre lo	10	Conocer las reacciones químicas que se dan en el momento de contacto entre las materias primas	7/4/2023	15/4/2023	8
que sucede y lo que se obtiene de la digestión anaerobia	11	Analizar el proceso termodinámico de lo que sucede, con cada una de las variables	16/4/2023	21/4/2023	5

Tabla 5. Elaboración propia.

9.2.Diseño y modelización del proceso de producción de biogás en Aspen Plus

9.2.1. Selección de los equipos y componentes necesarios para el proceso, como reactores, intercambiadores de calor, compresores y separadores

Digestor anaerobio: es el reactor principal donde se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica de la pulpa de café. Pueden ser de diferentes tipos, como, por ejemplo, el reactor de mezcla completa o el reactor de flujo ascendente de manto de lodo (UASB).

Sistema de alimentación: es el sistema encargado de suministrar la pulpa de café al reactor. Puede estar compuesto por bombas dosificadoras, mezcladores y sistemas de control de alimentación.

Sistema de agitación: el agitador dentro del digestor es necesario para mantener la mezcla en suspensión y evitar la formación de capas de sedimento en el fondo del reactor. Pueden ser de diferentes tipos, como, por ejemplo, agitadores mecánicos o agitadores neumáticos.

Sistema de recirculación: el sistema de recirculación es necesario para recircular el efluente del digestor al interior del mismo y mantener una mezcla homogénea. Puede estar compuesto por bombas y tuberías de recirculación.

Intercambiador de calor: es un equipo que se utiliza para precalentar la pulpa de café antes de ingresar al digestor, de modo que se logre una temperatura adecuada para el proceso de digestión. Pueden ser de diferentes tipos, como intercambiadores de calor de placas o de tubos.

Compresor de biogás: es el equipo encargado de comprimir el biogás generado en el digestor para su posterior almacenamiento o uso. Pueden ser de diferentes tipos, como compresores de tornillo o de pistón.

Separador de biogás: es el equipo encargado de separar el biogás generado en el digestor de las impurezas y el agua. Pueden ser de diferentes tipos, como separadores gravitatorios o de membrana

9.2.2. Definición de los flujos de entrada y salida del proceso

Flujos de entrada:

Pulpa de café fresca o almacenada

Agua (para ajustar el contenido de humedad)

Agente inoculante o cultivo de microorganismos

Flujos de salida:

Biogás (principalmente metano y dióxido de carbono)

Digestato (residuo sólido y líquido generado después de la digestión anaerobia)

Agua (contenida en el digestato y en el biogás)

Durante el proceso de simulación, se controlan los parámetros de entrada, como la cantidad y la calidad de la pulpa de café, la temperatura, el pH y la relación C/N, y se registran los flujos de salida de biogás, digestato y agua. Los flujos de salida pueden ser tratados y procesados posteriormente para su uso como fertilizante orgánico y para la generación de energía.

9.2.3. Modelización detallada de los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis utilizando los modelos de cinética de reacción disponibles en Aspen Plus

Definir los componentes y sus propiedades: se debe crear una corriente para los residuos de café y definir sus propiedades, como la densidad, el calor específico, la viscosidad, la composición química y el poder calorífico.

Se empiezan definiendo la serie de reacciones termodinámica que tienen lugar en todo el proceso de digestión anaerobia

Las reacciones que tiene el proceso de digestión anaerobia de residuos de café son

Reacciones de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis.

Hydrolysis reactions	Fractional conversion
$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$	0.4 ± 0.1
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow 2.5 C_2H_4O_2$	0.5 ± 0.2
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$	0.6 ± 0.0
$C_5H_{10}O_5 \rightarrow C_5H_4O_2 + 3H_2O$	0.6 ± 0.0
$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 2 C_2H_6O + 2 CO_2$	0.4 ± 0.1
$2 C_2H_6O + CO_2 \rightarrow 2 C_2H_4O_2 + CH_4$	0.6 ± 0.1
$Protein + 6 H_2O \rightarrow 6.5 CO_2 + 6.5 CH_4 + 3 NH_3 + H_2S$	0.5 ± 0.2

$C_5H_{10}O_6 + 3 H_2O \rightarrow C_3H_8O_3 + 3 C_{18}H_{34}O_2$	0.5 ± 0.2
$C_5H_9O_6 + 8.4375 H_2O \rightarrow 4 C_3H_8O_3 + 2.4375 C_{16}H_{34}O$	0.5 ± 0.3
$C_3H_6O_5 + 4.2875 H_2O \rightarrow 2.2 C_3H_8O_3 + 0.8875 C_{16}H_{34}O + 0.9 C_{18}H_{32}O_2$	0.6 ± 0.2
Acidogenesis reactions	Kinetic constant
$C_6H_{12}O_6 + 0.1115 NH_3 \rightarrow 0.1115 C_5H_7NO_2 + 0.744 C_2H_4O_2 + 0.5 C_3H_6O_2 + 0.4409 C_4H_8O_2 + 0.6909 CO_2 + 1.0254 H_2O$	$9.54 \cdot 10^{-3}$
Acetogenesis reactions	Kinetic constant
$C_{18}H_{34}O_2 + 15.2359 H_2O + 0.482 CO_2 + 0.1701 NH_3 \rightarrow 0.1701 C_5H_7NO_2 + 9.02 C_2H_4O_2 + 10.0723 H_2$	$3.64 \cdot 10^{-12}$

$C_3H_6O_2 + 0.06198 NH_3 + 0.314336 H_2O \rightarrow 0.06198 C_5H_7NO_2$ $+ 0.9345 C_2H_4O_2 + 0.660412 CH_4 + 0.160688 CO_2 + 0.000552 H_2$	$1.95 \cdot 10^{-7}$
$C_{18}H_{32}O_2 + 15.356 H_2O + 0.482 CO_2 + 0.1701 NH_3$ $\rightarrow 0.1701 C_5H_7NO_2 + 9.02 C_2H_4O_2 + 10.0723 H_2$	$3.64 \cdot 10^{-12}$
$C_{16}H_{34}O + 14 H_2O + 0.482 CO_2 + 0.172667 NH_3$ $\rightarrow 0.172667 C_5H_7NO_2 + 7.809334 C_2H_4O_2 + 15.036 H_2$	$3.64 \cdot 10^{-12}$
Methanogenesis reactions	Kinetic constant
$C_2H_4O_2 + 0.022 NH_3 \rightarrow 0.022 C_5H_7NO_2 + 0.945 CH_4$ $+ 0.066 H_2O + 0.945 CO_2$	$2.39 \cdot 10^{-3}$
$14.4976 H_2 + 3.8334 CO_2 + 0.0836 NH_3$ $\rightarrow 0.0836 C_5H_7NO_2 + 3.4154 CH_4 + 7.4996 H_2O$	$2.39 \cdot 10^{-3}$

Figura 2. Tomado de “A novel process simulation model for anaerobic digestion using aspen plus,(bioresource technology , 2014)

Se utilizan las reacciones de la tabla 5. Por ser reacciones de digestión anaerobia para residuos orgánicos, y a partir de esa información simular cada una en Aspen Plus.

Balance de masa

Con una fracción de conversión de 0.6 para la hidrólisis, 0.65 para la acidogénesis, 0.3 para la acetogénesis y 0.85 para la metanogénesis. Además, supongamos que la temperatura y presión del reactor son de 35°C y 1 atmósfera, respectivamente. La concentración de la biomasa en el reactor es de 5% (50 kg de biomasa en 950 kg de agua), y el volumen del reactor es de 20 m³. Finalmente, supongamos que la eficiencia de conversión de la biomasa en biogás es del 75%.

Con esta información, podemos realizar los cálculos para el balance de masa y energía.

Primero, calculemos la cantidad de biogás producido por hora:

$5000 \text{ kg/h} * 0.05 = 250 \text{ kg/h}$ de biomasa
 $250 \text{ kg/h} * 0.6 * 0.65 * 0.3 * 0.85 = 15.4 \text{ kg/h}$
 de biogás

Por lo tanto, se producen 15.4 kg/h de biogás.

Ahora, calculemos la composición del biogás producido:

- Metano: 60%

- Dióxido de carbono: 40%

Estos datos se utilizarán para el resultado final en Aspen Plus, donde se obtiene la salida de biogás, ya que, en su totalidad no será metano, estará compuesta en un 40% de dióxido de carbono.

Balance de masa, reacciones en el tanque

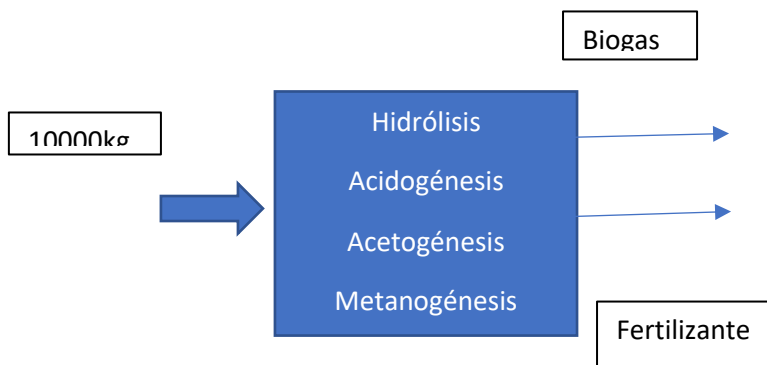


Figura 3. Elaboración propia

Para una alimentación constante, suceden las reacciones de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis, para obtener como resultado el biogás, sin embargo, por sus unidades, en peso sale en su gran mayoría digestato conocido también como un fertilizante.

Se agregan cada uno de los componentes en el simulador de Aspen

Componentes iniciales para obtención de biogás

Component ID	Type	Component name	Alias
ACETI-01	Conventional	ACETIC-ACID	C2H4O2-1
ALANI-01	Conventional	ALANINE	C3H7NO2
ARGIN-01	Conventional	ARGININE	C6H14N4O2-N2
ASPAR-01	Conventional	ASPARTIC-ACID	C4H7NO4
ETHYL-01	Conventional	ETHYL-CYANOACETATE	C5H7NO2
CELLU-01	Conventional	CELLULOSE	CELLULOSE
METHA-01	Conventional	METHANE	CH4
CYSTE-01	Conventional	CYSTEINE-E-2	C3H6NO2S-E
CARBO-01	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
ETHAN-01	Conventional	ETHANOL	C2H6O-2
DEXTR-01	Conventional	DEXTRROSE	C6H12O6
L-GLU-01	Conventional	L-GLUTAMIC-ACID	C5H9NO4
GLYCE-01	Conventional	GLYCEROL	C3H8O3
FURFU-01	Conventional	FURFURAL	C5H4O2
HYDRO-01	Conventional	HYDROGEN	H2
HYDRO-02	Conventional	HYDROGEN-SULFIDE	H2S
GLUTA-01	Conventional	GLUTARIC-ACID	C5H8O4
ISOLE-01	Conventional	ISOLEUCINE	C6H13NO2-I
INERT	Pseudocomponent		
KERATIN	Pseudocomponent		
LEUCINE	Conventional	LEUCINE	C6H13NO2
LINOLEIC	Conventional	LINOLEIC-ACID	C18H32O2
NH3	Conventional	AMMONIA	H3N
OLEIC-01	Conventional	OLEIC-ACID	C18H34O2
1-HEX-01	Conventional	1-HEXADECANOL	C16H34O
L-PHE-01	Conventional	L-PHENYLALANINE	C9H11NO2
PROLI-01	Conventional	PROLINE	C5H9NO2-N8
PROPI-01	Conventional	PROPIONIC-ACID	C3H6O2-1
PROTEIN	Pseudocomponent		
SERINE	Conventional	SERINE	C3H7NO3
SN-1--01	Conventional	SN-1-PALMITO-2-LINOLEIN	C37H68O5-1
THREO-01	Conventional	THREONINE	C4H9NO3
TRIOLE-01	Conventional	TRIOLEIN	C57H104O6
TRIPA-01	Conventional	TRIPALMITIN	C51H98O6
VALINE	Conventional	VALINE	C5H11NO2
H2O	Conventional	WATER	H2O
XYLOSE	Conventional	D-XYLOSE	C5H10O5
ISOBU-01	Conventional	ISOBUTYRIC-ACID	C4H8O2-4

Figura 4. Tomado de Aspen Plus V11

Para simular las reacciones de toda la digestión anaerobia de la pulpa de café, como primer paso, es esencial iniciar con los componentes que hacen parte de cada una de las reacciones,

Reacciones de hidrólisis en Aspen Plus

1	Frac. conversion		kmol/hr	0,5 CELLU-01	CELLU-01 + H2O --> DEXTR-01(MIXED)
2	Frac. conversion		kmol/hr	0,4 GLUTA-01	GLUTA-01 + H2O --> 2,5 ACETI-01(MIXED)
3	Frac. conversion		kmol/hr	0,6 GLUTA-01	GLUTA-01 + H2O --> XYLOSE(MIXED)
4	Frac. conversion		kmol/hr	0,6 XYLOSE	XYLOSE --> FURFU-01(MIXED) + 3 H2O(MIXED)
5	Frac. conversion		kmol/hr	0,5 CELLU-01	CELLU-01 + H2O --> 2 ETHAN-01(MIXED) + 2 CARBO-01(MIXED)
6	Frac. conversion		kmol/hr	0,7 ETHAN-01	2 ETHAN-01 + CARBO-01 --> 2 ACETI-01(MIXED) + METHA-01(MIXED)
7	Frac. conversion		kmol/hr	0,7 PROTEIN	PROTEIN + 6 H2O --> 6,5 CARBO-01(MIXED) + 6,5 METHA-01(MIXED) + 3 NH3(MIXED) + HYDRO-02(MIXED)
9	Frac. conversion		kmol/hr	0,7 TRIOL-01	TRIOL-01 + 3 H2O --> 3 OLEIC-01(MIXED) + GLYCE-01(MIXED)
10	Frac. conversion		kmol/hr	0,8 TRIPA-01	TRIPA-01 + 8,4375 H2O --> 4 GLYCE-01(MIXED) + 2,4375 1-HEX-01(MIXED)
11	Frac. conversion		kmol/hr	0,8 SN-1--01	SN-1--01 + 4,2875 H2O --> 2,2 GLYCE-01(MIXED) + 0,8875 1-HEX-01(MIXED) + 0,9 LINOLEIC(MIXED)

Figura 5. Tomado de Aspen Plus

En esta etapa, las moléculas grandes de materia orgánica, como carbohidratos, lípidos y proteínas, se descomponen en moléculas más pequeñas mediante la acción de enzimas extracelulares secretadas por microorganismos. La hidrólisis facilita la posterior degradación de la materia orgánica

Reacción acidogénesis en Aspen Plus

Rxn No.	Reaction type	Stoichiometry	Delete
1	Kinetic	DEXTR-01 + 0,1115 NH3 --> 0,1115 ETHYL-01(MIXED) + 0,744 ACETI-01(MIXED) + 0,5 PROPI-01(MIXED) + 0,4409 ISOBU-01(MIXED) + 0,6909 CARBO-01(MIXED) + 1,0254 H2O(MIXED)	

Figura 6. Tomado de Aspen Plus

En esta etapa, los productos de la hidrólisis se fermentan aún más, y los microorganismos convierten los azúcares y aminoácidos en ácidos orgánicos de cadena corta, como ácido acético, ácido butírico y ácido láctico. Esta fermentación produce ácidos y algunos subproductos, como CO2 e hidrógeno.

Reacción acetogénesis en Aspen Plus

Rxn No.	Reaction type	Stoichiometry	Delete
1	Kinetic	OLEIC-01 + 15,2359 H2O + 0,482 CARBO-01 + 0,1701 NH3 --> 0,1701 ETHYL-01(MIXED) + 9,02 ACETI-01(MIXED) + 10,0723 HYDRO-01(MIXED)	✗
3	Kinetic	LINOLEIC + 15,356 H2O + 0,482 CARBO-01 + 0,1701 NH3 --> 0,1701 ETHYL-01(MIXED) + 9,02 ACETI-01(MIXED) + 10,0723 HYDRO-01(MIXED)	✗
4	Kinetic	1-HEX-01 + 14 H2O + 0,482 CARBO-01 + 0,172667 NH3 --> 0,172667 ETHYL-01(MIXED) + 7,80933 ACETI-01(MIXED) + 15,036 HYDRO-01(MIXED)	✗
2	Kinetic	PROPI-01 + 0,06198 NH3 + 0,314336 H2O --> 0,06198 ETHYL-01(MIXED) + 0,9345 ACETI-01(MIXED) + 0,660412 METHA-01(MIXED) + 0,160688 CARBO-01(MIXED) + 0,000552 HYDRO-01(MIXED)	✗

Figura 7. Tomado de Aspen Plus

En esta etapa, los ácidos orgánicos de cadena corta producidos en la acidogénesis se convierten en ácido acético, hidrógeno y CO2 por medio de bacterias acetogénicas

Reacción metanogénesis en Aspen Plus

Rxn No.	Reaction type	Stoichiometry	Delete
1	Kinetic	ACETI-01 + 0,022 NH3 --> 0,022 ETHYL-01(MIXED) + 0,945 METHA-01(MIXED) + 0,066 H2O(MIXED) + 0,945 CARBO-01(MIXED)	✗
2	Kinetic	14,4976 HYDRO-01 + 3,8334 CARBO-01 + 0,0836 NH3 --> 0,0836 ETHYL-01(MIXED) + 3,4154 METHA-01(MIXED) + 7,4996 H2O(MIXED)	✗

Figura 8. Tomado de Aspen Plus

En la última etapa, los productos de la acetogénesis se convierten en metano (CH4) y CO2 mediante la acción de bacterias metanogénicas. Estas bacterias son sensibles al oxígeno y solo pueden crecer en un ambiente anaeróbico.

9.2.4. Establecimiento de los parámetros de simulación y validación del modelo con datos experimentales previos

NRTL es un modelo de actividad de solución no ideal utilizado en termodinámica química para estimar las propiedades termodinámicas de soluciones no ideales.

El modelo NRTL (Non-random Two Liquids) se basa en la suposición de que la solución se divide en dos fases líquidas, y la actividad de cada componente se calcula como una combinación lineal de las actividades en cada fase líquida. Este modelo es útil para

calcular las propiedades de soluciones en las que los iones se encuentran en altas concentraciones y tienen una fuerte interacción entre sí.

Se elige el modelo a utilizar

Método utilizado para la simulación

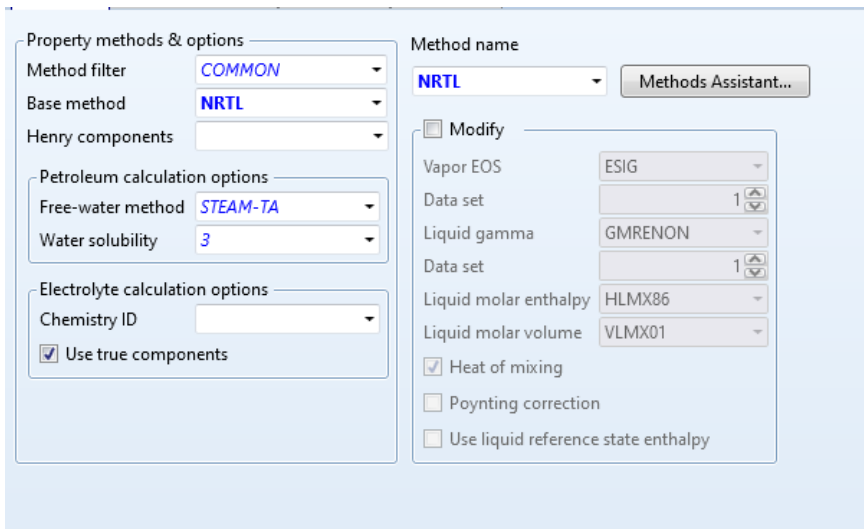


Figura 9. Tomado de Aspen Plus V11

Se diseña el diagrama de la reacción

Diagrama obtención de biogás

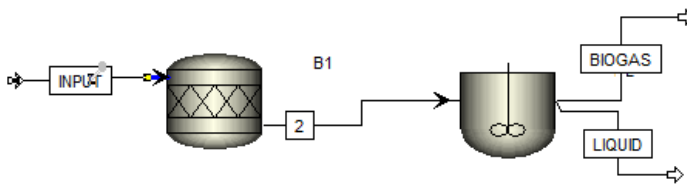


Figura 10. Tomado de Aspen Plus V11

Se utilizan para las reacciones un reactor CSTR y stoichimetric.

Un reactor CSTR es un tipo de reactor químico continuo que se utiliza para llevar a cabo reacciones químicas en fase líquida. Consiste en un tanque agitado continuamente donde se mezclan los reactivos y se mantiene una temperatura y presión constante. En un reactor CSTR, los reactivos entran y salen del reactor continuamente, y la velocidad de flujo de entrada es igual a la velocidad de flujo de salida. Además, el contenido del reactor se mezcla continuamente mediante un agitador para mantener una distribución uniforme de los reactivos y productos. La velocidad de reacción en un reactor CSTR se controla por la velocidad de alimentación de los reactivos y la concentración de los mismos en el tanque. Fogler, SA (2016)

Un reactor stoichiometric es un tipo de reactor químico en el que las proporciones de los reactivos se ajustan exactamente para que se produzca una reacción completa y se consuman todos los reactivos en el proceso. En este tipo de reactor, la alimentación de los reactivos se realiza de forma continua y en cantidades estequiométricas, y la reacción se lleva a cabo en un solo paso. Debido a que no hay exceso de reactivos, el reactor stoichiometric es útil para minimizar la formación de subproductos y mejorar la eficiencia de la conversión de reactivos a productos. Fogler, SA (2016)

Condiciones iniciales

The screenshot shows the Aspen Plus software interface for setting reaction specifications. The 'Specifications' tab is selected. Under 'Operating conditions', the 'Flash Type' is set to 'Temperature' and 'Pressure'. The 'Temperature' field is set to 55 C, and the 'Pressure' field is set to 1 atm. The 'Duty' field is set to kcal/hr, and the 'Vapor fraction' field is empty. Under 'Valid phases', the dropdown menu is set to 'Vapor-Liquid'.

Figura 11. Tomado de Aspen Plus

Demostraron ser condiciones ideales para la obtención de biogás a partir de pulpa de café.

Además, la temperatura es un factor clave que afecta la velocidad microbiana, por eso se utilizan rangos de temperatura de 35-55°C.

Alimentación al proceso de digestión anaerobia

El mucílago de café está compuesto principalmente por carbohidratos como la glucosa, galactosa y lactosa, así como proteínas y siringaldehído. También contiene una variedad de minerales como arsénico, potasio, hierro, cobre, magnesio y sodio, aunque en cantidades menores.

Composición de pulpa de café

<i>Componente</i>	<i>G%</i>
<i>Agua</i>	<i>81.8</i>
<i>Celulosa</i>	<i>17.7</i>
<i>Hemicelulosa</i>	<i>0.23</i>
<i>Amoniaco</i>	<i>0.1</i>
<i>Dextrosa</i>	<i>0.17</i>

Tabla 6. Adaptado de: Rodríguez, N., & Zambrano, D. A. (2013).

Alimentación en la entrada

Flash Type Temperature Pressure

State variables

Temperature C

Pressure atm

Vapor fraction

Total flow basis Mass

Total flow rate kg/day

Solvent

Reference Temperature

Volume flow reference temperature C

Component concentration reference temperature C

Figura 12. Tomado de Aspen Plus.

9.3. Análisis de sensibilidad y optimización del proceso

9.3.1. Realización de análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que más influyen en la eficiencia del proceso

Un contenido de humedad adecuado permite una mejor mezcla y homogeneización de la pulpa de café en el reactor, lo que favorece la actividad microbiana y la producción de biogás.

La relación C/N es un factor importante para el crecimiento y la actividad de los microorganismos que degradan la materia orgánica. Si la relación C/N no es óptima, puede haber una limitación en la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, lo que puede afectar su actividad y reducir la producción de biogás.

La temperatura es un factor clave que afecta la velocidad de la actividad microbiana y, por lo tanto, la tasa de producción de biogás. Una temperatura óptima favorece la actividad de los microorganismos y aumenta la producción de biogás.

El TRH es el tiempo que la pulpa de café permanece en el reactor y, por lo tanto, es un factor determinante en la eficiencia del proceso de producción de biogás. Un TRH más prolongado permite una mayor degradación de la materia orgánica y, por lo tanto, una mayor producción de biogás.

el pH es un factor crítico para la actividad microbiana y la producción de biogás. Un pH adecuado permite una actividad microbiana óptima y, por lo tanto, una producción de biogás más eficiente.

la carga orgánica se refiere a la cantidad de materia orgánica que se introduce en el reactor en un determinado período de tiempo. Si la carga orgánica es demasiado alta, puede haber una acumulación de productos de degradación que pueden ser tóxicos para

los microorganismos, lo que puede reducir la eficiencia del proceso y la producción de biogás.

9.3.2. Optimización del proceso mediante la selección de las mejores condiciones operativas para maximizar la producción de biogás y la calidad del mismo

La optimización del proceso de digestión anaerobia de la pulpa de café para la obtención de biogás dependerá de encontrar un equilibrio entre las variables mencionadas anteriormente. La condición de estas variables operativas podrá mejorar significativamente la eficiencia de producción de biogás y reducir los costos operativos.

9.3.3. Análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación

Producción de CO2 para 10000

Summary		
Hierarchy	PLANT	
Net stream CO2e	483,14	kg/day
Utility CO2e	0	kg/day
Total CO2e	483,14	kg/day
Net carbon fee / tax	0	\$/hr

Feed stream name	Flow	CO2e
	kg/day	kg/day
▶ INPUT	10000	0

Product stream name	Flow	CO2e
	kg/day	kg/day
▶ BIOGAS	378,056	337,006
LIQUID	9621,94	146,134

Figura 14. Imagen tomada de Aspen plus V11

Producción de CO2 Para entrada de 5000

Summary		
Hierarchy	PLANT	
Net stream CO2e	241,57	kg/day
Utility CO2e	0	kg/day
Total CO2e	241,57	kg/day
Net carbon fee / tax	0	\$/hr

Feed stream name	Flow	CO2e
	kg/day	kg/day
▶ INPUT	5000	0

Product stream name	Flow	CO2e
	kg/day	kg/day
▶ BIOGAS	189,028	168,503
▶ LIQUID	4810,97	73,067

Figura 15. Imagen tomada de Aspen plus V11

Resultados

Para el caso de una alimentación de 5000 kg/h de residuos de café en un reactor CSTR, el balance de masa muestra que se producen 189.028 kg/día de biogás, lo que representa un valor de producción de $0.018 \frac{m^3}{kg}$, basándose en el balance de masa en donde la salida representa en fracciones un 60% de metano y un 40% de dióxido de carbono, el balance de energía indica que la energía de entrada es de 31845,8 kJ/h, mientras que la energía de salida es de 31649,5 kJ/h, lo que resulta en una pérdida neta de energía de 196,3 kJ/h.

En cuanto a la entalpía y entropía, el biogás generado tiene una entalpía de 395,1 kJ/kg y una entropía de 7,0 J/ (mol K), lo que indica que es una mezcla de gases a una temperatura y presión específicas con un alto contenido energético.

Por otro lado, para una alimentación de 10000 kg/h de residuos de café en el mismo reactor CSTR, lo que representa un valor de producción de $0.018 \frac{m^3}{kg}$, basándose en el balance de masa en donde la salida representa en fracciones un 60% de metano y un 40% de dióxido de carbono .El balance de energía indica que la energía de entrada es de 63691,5 kJ/h, mientras que la energía de salida es de 63318,9 kJ/h, lo que resulta en una pérdida neta de energía de 372,6 kJ/h.

En cuanto a la entalpía y entropía, el biogás generado tiene una entalpía de 395.3 kJ/kg y una entropía de 7.1 J/ (mol K), lo que indica que es una mezcla de gases a una temperatura y presión específicas con un alto contenido energético.

En general, se puede observar que a partir de la pulpa de café se obtienen por cada kg de este residuo $0.018 m^3$ de metano, mientras que la pérdida neta de energía aumenta con una mayor tasa de alimentación de materia prima. La entalpía y entropía del biogás generado en ambos casos son similares, lo que indica que la calidad del biogás no se ve afectada significativamente por el aumento de la tasa de alimentación.

10. Análisis de resultados

El proceso de obtención de biogás a partir de la pulpa de café es una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente en comparación con los métodos convencionales de producción de biogás. Una de las principales ventajas de este proceso es la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), lo que contribuye a la mitigación del cambio climático.

Es importante tener en cuenta que, aunque se produce CO₂ durante la digestión anaerobia, el biogás resultante contiene una proporción mucho mayor de metano, que es un gas de efecto invernadero más potente. El biogás se utiliza como fuente de energía renovable, y la captura y uso del metano contenido en él ayuda a reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en comparación con la liberación directa de metano a la atmósfera que ocurriría si los residuos orgánicos se desecharan sin tratar.

Según los datos proporcionados, en el proceso de obtención de biogás con pulpa de café se emiten 483.14 kg de CO₂ por día, considerando un flujo de entrada de 10,000 kg por día. Esta emisión de CO₂ se debe principalmente a la liberación de CO₂ durante las etapas de fermentación y metanogénesis de la digestión anaerobia.

Para realizar una comparación con la obtención de biogás de forma convencional, es necesario considerar las fuentes convencionales de biogás, como los residuos orgánicos no tratados que se descomponen naturalmente en vertederos. En estos casos, el proceso de descomposición anaerobia produce biogás, pero también emite grandes cantidades de CO₂ y metano (CH₄) a la atmósfera.

En comparación con la obtención de biogás convencional, el proceso de obtención de biogás a partir de la pulpa de café muestra una reducción significativa en las emisiones

de CO₂. Esto se debe a que el biogás producido a partir de la pulpa de café contiene principalmente metano, que tiene un potencial de calentamiento global mucho menor que el CO₂.

Es importante destacar que los valores específicos de emisiones de CO₂ pueden variar dependiendo de las condiciones operativas, las características de la pulpa de café y el diseño del proceso. Sin embargo, en general, la obtención de biogás a partir de la pulpa de café se considera una opción más sostenible y de menor impacto ambiental en comparación con los métodos convencionales

El proceso de producción de biogás a partir de la pulpa de café implica una serie de pasos clave para maximizar la producción de biogás y la calidad del mismo.

En primer lugar, se deben identificar las variables clave que afectan la producción de biogás, tales como la temperatura, el pH, la relación C/N, la velocidad de agitación, la concentración de sólidos totales, entre otras. Una vez identificadas, se seleccionan los valores óptimos para cada una de estas variables, los cuales deben estar dentro del rango operativo del proceso.

Es importante evaluar los efectos de interacción entre las variables clave para asegurarse de que cambios en una variable no afecten negativamente la producción de biogás o la calidad del mismo. Para esto, se pueden realizar ensayos experimentales o utilizar herramientas de simulación como Aspen.

Es crucial realizar un monitoreo continuo de las variables del proceso para asegurarse de que se están cumpliendo las condiciones óptimas de operación y realizar ajustes en caso de ser necesario. Esto puede incluir ajustes en la velocidad de agitación, la adición de nutrientes o ajustes en la temperatura.

Es importante destacar que la producción de biogás a partir de fuentes renovables, como la pulpa de café, presenta una reducción significativa en las emisiones de CO₂ en comparación con los procesos convencionales. Esto se debe al mayor contenido de metano en el biogás producido a partir de fuentes renovables, lo que reduce el potencial de calentamiento global total de las emisiones.

11. Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la simulación en Aspen Plus muestran que se lograron obtener resultado de producción de biogás, en los casos analizados, de diferentes flujos de entrada se obtuvieron resultados de $0.018m^3$ por cada kg de pulpa de café. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos datos pueden no ser completamente precisos ya que Aspen Plus es una herramienta que se acerca a los valores teóricos. Además, existen muchas variables que pueden influir en la eficiencia y los resultados obtenidos para la producción de biogás a partir de la pulpa de café, tales como la temperatura, el pH, la agitación, el poder calorífico, la inoculación, los factores de inhibición, la relación carbono-nitrógeno y el tipo de café utilizado.

En la simulación se utilizó un reactor adecuado para la digestión, pero es posible que se utilicen más reacciones y se obtengan resultados diferentes. Es importante destacar que los rangos óptimos de variables mencionados son indicativos y pueden variar dependiendo del sustrato utilizado, la configuración del proceso y las condiciones operativas específicas. Por lo tanto, se recomienda realizar pruebas de laboratorio y ajustar las condiciones operativas del proceso en consecuencia para obtener los mejores resultados en la producción de biogás a partir de la pulpa de café u otros sustratos orgánicos. Es demostrado también que la zona en donde crece la pulpa y a las condiciones en las que se encuentre esta misma tendrá diferentes composiciones que deberán tratarse de formas diferentes para obtener su eficiencia.

La producción de biogás a partir de la pulpa de café es una alternativa sostenible y rentable que puede ayudar a mitigar los efectos del cambio climático y generar ingresos adicionales para los productores de café. Sin embargo, para maximizar la producción de biogás y la calidad del mismo, se requiere un enfoque sistemático y cuidadoso que

involucre la identificación de las variables clave, la selección de los valores óptimos, la evaluación de los efectos de interacción, el monitoreo continuo y el ajuste del proceso.

La optimización del proceso puede lograrse a través de la combinación de ensayos experimentales y el uso de herramientas de simulación como Aspen, lo que permite la identificación de los parámetros clave que afectan la producción de biogás. Una vez identificados, es posible seleccionar los valores óptimos y ajustar el proceso de manera continua para maximizar la producción de biogás y la calidad del mismo.

El proceso de obtención de biogás a partir de la pulpa de café presenta una reducción significativa en las emisiones de CO₂ en comparación con la obtención convencional de biogás. Esta reducción se debe al uso de la pulpa de café como sustrato orgánico, que tiene un potencial de emisión de CO₂ menor durante la producción de biogás. Esta alternativa sostenible contribuye a la mitigación del cambio climático y promueve la utilización de residuos orgánicos de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

La producción de biogás a partir de la pulpa de café puede ser una alternativa sostenible para los productores de café, siempre y cuando se implementen las mejores prácticas de optimización del proceso. Esto puede tener un impacto significativo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento de residuos agrícolas, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y económica.

12. Referencias

DANE (2021). Producción Nacional de Café 2009-2020. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Colombia.

ICO (2015). Coffee production and sustainable development. International Coffee Organization.

Calixto, M.F., Silva, C.A., Chaves, M.H. et al. Environmental impact assessment of coffee wastewater from small-scale rural industries in Minas Gerais, Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 26, 20695–20702 (2019). DOI: 10.1007/s11356-019-05329-w

Mussatto, S.I., Dragone, G., Guimarães, P.M.R., Silva, J.P., Carneiro, L.M., Roberto, I.C. and Vicente, A.A. (2011). Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnology Advances*, 29(6), pp. 808-817. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.07.013

Grupo Consultivo de Expertos (GCE) – Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Sector de la Energía – Quema de Combustibles

En promedio, un colombiano emite al año 1,6 toneladas de CO₂. (2022, 28 de enero).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

<https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico/en-promedio-un-colombiano-emite-al-ano-16-toneladas-de-co2>

Use of coffee pulp as a medium for biogas production [Aprovechamiento de la pulpa de café como medio para producir biogás]

(2022) Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2022-July,

Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 39(1), 35-48.

Eyas Mahmoud, A.E. Atabani, Irfan Anjum Badruddin, Valorization of spent coffee grounds for biogas production: A circular bioeconomy approach for a biorefinery

Anastasia Kapioti, Dimitrios Komilis, Anaerobic co-digestion of coffee waste with other organic substrates: A mixture experimental design,

Bruno Vasconcelos da Rosa Pin, Regina Mambeli Barros, Electo Eduardo Silva Lora, Oscar Almazan del Olmo, Ivan Felipe Silva dos Santos, Eruin Martuscelli Ribeiro, João Victor de Freitas Rocha, Energetic use of biogas from the anaerobic digestion of coffee wastewater in southern Minas Gerais, Brazil, Renewable Energy, Volume 146, 2020.

Federico Battista, Debora Fino, Giuseppe Mancini, Optimization of biogas production from coffee production waste, Bioresource Technology, Volume 200, 2016.

International coffee organization - what's new. (n.d.). Ico.org. Retrieved March 16, 2023, from <https://www.ico.org/>

Del Castillo, E. V. Y. C. (2003). Conventional energies. development over one century. [Energías convencionales. Evolucion en un siglo] Revista De Obras Públicas, 150(3438), 89-94. Retrieved from www.scopus.com

Quinchía-Jaramillo, Y. A., Pérez-Serna, J., Herrera, G. M. D., & Acosta, Y. S. (2019). Parámetros de calidad de producción de biogás a partir de pulpa de café. *Agricolae & Habitat*, 2(1).

¿Qué es el biogás y cómo se obtiene? Conoce sus ventajas. (2023, 23 de febrero).

REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/cambio-climatico/biogas/index.cshtml>

S. M. D. (s/f). Climate change and public health. Stateimpactcenter.org. Recuperado el 17 de marzo de 2023, de <https://stateimpactcenter.org/insights/climate-and-health>

Braham, J. E., & Bressani, R. (1978). *Pulpa de café: composición, tecnología y utilización*. CIID, Ottawa, ON, CA.

Gotteland, M., & De Pablo, S. (2007). Algunas verdades sobre el café. *Revista chilena de nutrición*, 34(2), 105-115.

Anaerobic digestion of coffee wastewater with a high-strength organic wastewater: Performance and microbial community analysis. (Li et al., 2020)

Anaerobic treatment of coffee processing wastewater: A review. (de Souza et al., 2020)

The potential of coffee pulp and mucilage for biogas production in Nicaragua. (Zapata-Bonilla et al., 2017)

Co-digestion of coffee processing wastewater and cow manure for biogas production. (Sahinkaya et al., 2017)

Effect of inoculum-to-substrate ratio on biogas production from coffee pulp and mucilage. (Guevara-Martínez et al., 2016)

Biogas production from coffee pulp: An experimental study. (Macedo et al., 2015)

Biogas production from coffee pulp and coffee husk co-digestion. (Mendoza et al., 2015)

Biogas production from coffee wet processing wastewater (CWPW) using anaerobic sequencing batch reactors (ASBRs). (Rojas-Contreras et al., 2015)

Use of coffee wastewater for biogas production: A comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. (Vargas et al., 2014)

Biogas production from coffee husk using an anaerobic fixed bed reactor. (López-Ángeles et al., 2014)

Anaerobic digestion of coffee processing wastewater using upflow anaerobic sludge blanket reactor. (Sastry et al., 2014)

Performance of anaerobic digestion process treating coffee pulp and its kinetic parameters. (Fierro et al., 2013)

Anaerobic digestion of coffee processing wastewater: Effect of hydraulic retention time (HRT) and organic loading rate (OLR) on methane yield. (Fierro et al., 2012)

Biogas production from coffee processing wastewater in an upflow anaerobic filter reactor. (Alves et al., 2012)

Performance evaluation of a two-stage anaerobic system for the treatment of coffee processing wastewater. (Lara-Cisneros et al., 2012)

Biogas production from coffee processing wastewater in a UASB reactor. (López-Ángeles et al., 2011)

Anaerobic digestion of coffee wastewater in an anaerobic sequencing batch reactor. (Hernández-Sancho et al., 2011)

Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A. y Sanders, W.T.M. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45(10), 65–73.

Hwu, C.-S., Chiang, C.-F., Huang, C.-C. y Yang, K.-C. (2018). Anaerobic digestion of food waste – A review focusing on hydrolysis, acidogenesis, and methane fermentation. *Bioresource Technology*, 248, 68–78.

Karim, K., Hoffmann, R. y Klasson, K.T. (2005). Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Bioresource Technology*, 96(4), 491–498.

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M. y Mahmood, T. (2011). Anaerobic digestion: A way to control pollution from livestock waste. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 336–347.

Kougias, P.G., Boe, K., O-Thong, S., Angelidaki, I. y Pena, R. (2017). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 245, 1214–1222.

Bai, Y., Cai, J., Sun, J., & Fang, M. (2018). Optimization of biogas upgrading by amine absorption using Aspen Plus simulation. *Energy Conversion and Management*, 174, 270-276

López-González, L. M., & Pérez-Sánchez, M. (2018). Simulation of a biogas plant from coffee industry wastes using Aspen Plus. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1107, No. 5, p. 052006). IOP Publishing

Pardo-Planas, O., Viñas, M., & Astals, S. (2016). Modelling the anaerobic co-digestion of coffee and cow manure using Aspen Plus. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 475-480

Wang, Q., et al. (2013). Effect of temperature on performance and microbial community of a hybrid anaerobic solid-liquid system for treating food waste. *Bioresource technology*, 135, 9-17.

Gavala, H. N., et al. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*, 37(18), 4561-4572.

Angelidaki, I., et al. (2004). Anaerobic wastewater treatment, In Handbook of biological wastewater treatment (pp. 287-319). IWA Publishing.

Jalilzadeh, Y., et al. (2019). Effect of temperature on biogas production and microbial community in co-digestion of fruit and vegetable waste with dairy manure. *Bioresource technology*, 291, 121775.

Chen, Y., Cheng, J.J., & Creamer, K.S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource technology*, 99(10), 4044-4064. doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.057

García-Encina, P.A., Sánchez, E., Santos, V.E., & Irizar, I. (2000). Anaerobic digestion of sludge from a wastewater treatment plant: a systematic study. *Water research*, 34(17), 4210-4216. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00223-1

Jalilzadeh, Y., Taherzadeh, M.J., & Ejlertsson, J. (2019). Anaerobic digestion of solid waste: a review. *Waste management*, 92, 255-274. doi: 10.1016/j.wasman.2019.05.029

Xie, S., Law, Y., Li, X., & Zhan, X. (2018). Anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater: a review. *Journal of environmental management*, 206, 319-329. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.11.055

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., & Pavlostathis, S. G. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45(10), 65-73. doi: 10.2166/wst.2002.0292

Gavala, H. N., Skiadas, I. V., & Lyberatos, G. (2004). Anaerobic digestion of olive mill wastewater in upflow anaerobic sludge blanket reactors with and without an internal circulation system. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 79(8), 923-930. doi: 10.1002/jctb.1051

Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T., & Yuan, Q. (2007). Influence of stirring speed and substrate concentration on anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 98(3), 523-529. doi: 10.1016/j.biortech.2006.02.019

Jalilzadeh, Y., Karimi, K., Taherzadeh, M. J., Horváth, I. S., & Niklasson, C. (2019). Biogas production from fruit and vegetable waste using a two-stage anaerobic digestion system: Effect of mixing intensity. *Waste Management*, 91, 56-64. doi: 10.1016/j.wasman.2019.03.034

Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2007). Kinetic modeling of municipal solid waste digestion under mesophilic and thermophilic conditions. *Bioresource Technology*, 98(15), 2909-2916. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.023>

Sun, Y., Huang, J., Gao, X., & Liu, H. (2014). Performance of a temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) system for treating sewage sludge. *Bioresource Technology*, 166, 455-462. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.017>

Dohányos, M., Zabranska, J., Pokorna-Krayzelova, L., & Kutil, J. (2013). Co-digestion of agricultural and industrial wastes. *Waste Management*, 33(12), 2661-2667. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.017>

Jalilzadeh, Y., Karimi, K., & Zamani, A. (2020). Optimization of organic loading rate and hydraulic retention time for biogas production from fruit and vegetable waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(6), 1543-1553. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01088-w>

Angelidaki, I., & Sanders, W. (1993). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2(4), 317-338. doi: 10.1007/BF02937198

- Kleyböcker, A., Liebrich, M., Verstraete, W., & Kraume, M. (2012). Co-digestion of maize silage and sugar beet silage in laboratory batch and continuous stirred tank reactors: Effects of organic loading rate and inoculum. *Bioresource Technology*, 110, 369-377. doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.046
- Liu, Y., Zhang, R., Liu, G., & Liu, H. (2015). Biogas production from fruit and vegetable waste using an anaerobic baffled reactor with luffa sponge as support material. *Bioresource Technology*, 186, 163-169. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.053
- Zhu, N., Wang, X., & Yuan, H. (2016). Effects of inoculum-to-substrate ratio on anaerobic digestion of green waste: Focusing on inoculum source and adaptation. *Bioresource Technology*, 219, 384-390. doi: 10.1016/j.biortech.2016.08.031
- Song, Y., Xu, Y., Chen, Y., Pang, C., Liu, X., & Wang, D. (2020). Synergistic effect of cow manure and digested sludge on anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, 314, 123729. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123729
- Li, Y.-Y., Jin, Y.-L., Li, X.-M., & Yu, Q. (2011). Inhibition and adaptation of anaerobic digestion to ammonia nitrogen in swine manure with different substrate concentrations. *Environmental technology*, 32(13), 1435-1440.
- Kassahun, H. T., Zhang, Y., Ucisik, A. S., & Frigon, J. C. (2017). Impact of metal content and composition on anaerobic digestion of municipal solid waste. *Journal of hazardous materials*, 321, 606-616.
- Liu, C., Yuan, X., Zeng, G., Liang, J., & Liu, L. (2015). Effect of volatile fatty acid concentrations on methane production and microbial community composition in anaerobic digestion of pig manure. *Bioresource technology*, 192, 674-680.

- Jalilzadeh, Y., Sharifi, M., Taherzadeh, M. J., & Ebrahimi, S. (2020). Inhibition and adaptation of anaerobic digestion of fruits and vegetables waste to long chain fatty acids. *Bioresource technology*, 313, 123725.
- Batstone, D. J., Keller, J., & Angelidaki, I. (2002). The influence of substrate concentration on the hydrogen threshold value. *Water Science and Technology*, 45(10), 43-50.
- Liu, Y., Li, J., Li, X., & Yuan, H. (2017). Influence of substrate to inoculum ratio on the anaerobic digestion of sewage sludge. *Journal of Environmental Sciences*, 51, 259-267.
- Zhang, Y., Fu, B., Zhang, X., Zhang, X., Sun, L., Chen, Y., & Liu, Y. (2015). The effect of C/N ratio on the performance of anaerobic co-digestion of kitchen waste and rice straw. *Environmental Technology*, 36(13-16), 1755-1762.
- Chua, A. D., Tey, B. T., Chan, Y. J., Abdullah, M. A., & Show, P. L. (2021). Optimization of carbon-to-nitrogen ratio for high performance anaerobic digestion of food waste. *Waste Management*, 126, 166-174.
- Rodríguez, L. F., Romero, L. I., & Romero, M. (2014). Anaerobic digestion of coffee pulp: Study of the kinetic parameters. *Energy Conversion and Management*, 86, 436-443.
- De Mesquita, L. M. S., Ferreira-Leitão, V. S., & Rodrigues, J. A. D. (2019). Performance evaluation of an UASB reactor treating coffee processing wastewater. *Journal of Environmental Management*, 249, 109373.
- Valencia, A., Lema, J. M., & Rodríguez, J. (2020). Biogas production from coffee pulp co-digested with other organic waste. *Renewable Energy*, 145, 1322-1328.
- Lora, E. E. S., Agudelo, J. R., & Costa, F. F. (2019). Anaerobic digestion of coffee pulp in a two-phase system. *Journal of Environmental Management*, 238, 228-234.

Rincón, B. et al. (2020). Producción de biogás a partir de mucílago de café y sus mezclas con estiércol y pasto: una digestión anaerobia discontinua y continua. *Tecnología de biorecursos*, 306, 123160. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123160>

Fogler, SA (2016). *Elementos de ingeniería de reacciones químicas*. Pearson.

Optimization of bioethanol production from coffee mucilage (p.4) B. PérezSariñana et al., 2015, *BioResources*.

Segura-Campos MR, Chel-Guerrero L, Betancur-Ancona D, Martín-Belloso O (2019) Chemical composition and functional properties of coffee pulp. *CyTA-J Food* 17(1):185-193. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1558533>

Wang X, Ding Z, Li T, Liu J, Wang C, Zhan J, Jiang H, Zhang X (2018) Chemical composition of coffee pulp and its potential as a supplement for ruminants: a comparison among six varieties of arabica coffee. *Animal Feed Science and Technology* 245:38-45. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.011>

Ariza MT, Rebollo-Hernanz M, Martín-Cabrejas MA, Soria-Florido MT, González de la Huebra MJ, Esteban RM (2016) Phenolic profile in the pulp of coffee (*Coffea arabica* L.) fruit from three different varieties. *Food Research International* 89:44-51. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.016>

Ballesteros LF, Teixeira AA, Tonial IB, Furlong EB, de Almeida PG, dos Santos RC, de Oliveira EA, de Oliveira TF (2015) Organic acids and sugars

González-Pérez, B., García-Reyes, R. B., Cruz-Salomón, A., Rodríguez-Herrera, R., & García-Sánchez, A. (2018). Anaerobic digestion of coffee pulp for biogas production: Effect of concentration on kinetics parameters. *Waste Management*, 78, 438-445. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.038>

De Gisi, S., Notarnicola, M., & Rosa, L. (2017). Performance of a batch mesophilic anaerobic co-digestion process of coffee waste and olive mill wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 151, 460-469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.046>

Flórez-Gómez, L., Gómez-Sánchez, M., Rojas-Molina, J. I., Díaz-Zurita, F., & Montoya-Peláez, P. J. (2020). Biogas production from coffee pulp using a full-scale anaerobic digester: Effect of operational parameters and nutrient supplementation. *Bioresource Technology Reports*, 11, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100476>

Rodríguez, J. A., Lopera, C. D., Agudelo, J. R., & Cardona, C. A. (2017). Biogas production from coffee pulp: Combining wet and dry anaerobic digestion. *Waste Management*, 68, 661-667. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.036>