

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Evaluación del proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café
(pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino en un biodigestor bajo condiciones reales en una
finca cafetera

Karina Paola Jaimes Cogua y Claudia Jimena Pachón Rodríguez

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico
Modalidad Trabajo de Investigación

Directora

Liliana del Pilar Castro Molano
Ingeniera Química, Ph.D.

Codirectores:

Humberto Escalante Hernández
Ingeniero Químico, Ph.D.

María Paula Garay Jácome
Ingeniera Química, MSc.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por darme la fortaleza, salud y energía para culminar este proyecto.

A mis padres, Lilia y Teodoro, quienes han sido mi mayor apoyo en cada uno de mis proyectos.

Gracias por brindarme un hogar lleno de paz y alegría, por acompañarme en cada paso, por entenderme, creer en mí y quererme siempre. Su resiliencia y esfuerzo son mi mayor ejemplo e inspiración para ser mejor cada día. Cada logro que alcanzo también es suyo. Los quiero con todo mi corazón.

A mis hermanas, Sonia y Natalia, por cada palabra de apoyo, por escucharme, acompañarme en todo momento y brindarme siempre su amor incondicional.

A mis sobrinas, Maite y Elisa, mis niñas, las amo profundamente. Son mi mayor alegría; gracias por existir y por llenar mi vida de amor.

A mi compañero de vida, David Santiago, por ser un pilar fundamental durante mi etapa universitaria. Gracias por tu apoyo incondicional, por comprenderme, escucharme, creer en mí y acompañarme a lo largo de este camino.

A Karina, por compartir este proceso conmigo, por tu compañía, por cada risa y por cada palabra de aliento en los momentos difíciles. No pude haber tenido una mejor compañera. Gracias por todo.

A mis compañeros de universidad, especialmente a Iván, por cada momento compartido a lo largo de la carrera y por hacer de esta etapa de mi vida una experiencia inolvidable, llena de aprendizaje, risas y amor.

Claudia Jimena Pachón Rodríguez

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

A Dios, quien me otorgó salud, fortaleza y las capacidades necesarias para culminar este proceso.

A mi madre, quien con su esfuerzo, resiliencia y dedicación me ha dado todo para convertirme en la profesional que soy hoy. Su confianza, su ejemplo y su amor incondicional me inspiran a mejorar cada día.

A mi padre, su amor, paciencia, palabras de apoyo, consejos y enseñanzas fueron claves para recorrer este camino.

A mis tías y abuelos, quienes, desde su infinito amor, me enseñaron los valores que han hecho de mí la mujer que soy.

A mi pareja, quien camino a mi lado durante este recorrido, escuchándome y apoyándome en momentos de duda e incertidumbre. Su amor fue clave para finalizar este proceso.

A mi compañera de tesis, quien, a pesar de las dificultades, perseveró conmigo hasta el final.

A mi pana, su carisma y buena actitud jugo un papel clave durante todo este proceso.

A Pachis, Mufasa, Coco, Bigotes, Estrella, Melcocha y Chimuela.

Karina Paola Jaimes Cogua

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de formarnos con docentes excepcionales, que nos brindaron sus conocimientos y participaron en nuestra formación profesional.

A los profesores Humberto Escalante y Liliana Castro, por compartir su conocimiento y experiencia con generosidad y paciencia. Su guía fue fundamental en el correcto desarrollo de esta tesis.

A la magister María Paula Garay, por sus enseñanzas, consejos y apoyo en cada etapa de este trabajo. Su compromiso nos permitió la culminación de esta tesis.

Al grupo de investigación INTERFASE y al laboratorio de Digestión Anaeróbica, por brindarnos un espacio de aprendizaje y el desarrollo de las pruebas experimentales.

A Don Guillermo, por su valiosa colaboración en las diferentes pruebas de laboratorio y por su constante disposición para ayudarnos.

A la familia Tarazona por abrirnos las puertas de su finca, en especial a Don Juvenal, por su compromiso con el proyecto, así como por su tiempo y disposición durante el desarrollo de este.

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos	16
1.1. Objetivo general	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. Marco conceptual	17
2.1. Beneficio del café	17
2.2. Digestión anaerobia	18
2.3. Co-digestión anaerobia	20
3. Estado del arte	21
4. Metodología	23
4.1. Estabilidad del proceso de CoDA	24
4.1.1. <i>Información del caso de estudio.</i>	24
4.1.2. <i>Recolección y caracterización de los sustratos.</i>	27
4.1.3. <i>Ajuste operativo para la implementación de la mezcla sinérgica.</i>	27
4.1.4. <i>Evaluación de la estabilidad</i>	29
4.1.5. <i>Grado de acidificación del biodigestor</i>	30
4.2. Análisis de la eficiencia operacional de la CoDA	31
4.2.1. <i>Monitoreo de la remoción de la materia orgánica.</i>	31

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

5. Resultados	32
5.1. Estabilidad del proceso de Co-Digestión Anaerobia	32
5.1.1. <i>Caracterización de los sustratos</i>	32
5.1.2. <i>Ajuste operativo para la implementación de la mezcla sinérgica.</i>	33
5.1.3. <i>Evaluación de la estabilidad del proceso de CoDA.</i>	34
5.1.3.1 <i>Monitoreo del pH y AGV en operación semicontinua</i>	34
5.1.3.2. <i>Calidad del biogás producido</i>	39
5.1.4 <i>Grado de acidificación</i>	40
5.2. Análisis de la eficiencia operacional de la CoDA.	42
5.2.1 <i>Remoción y dinámica de la demanda química de oxígeno.</i>	42
5.2.2. <i>Dinámica de los sólidos volátiles</i>	45
Conclusiones	46

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros medidos para la caracterización fisicoquímica de los sustratos	27
Tabla 2. Límite de concentración para los indicadores de inhibición del proceso de DA	29
Tabla 3. Límites de concentraciones de ácidos de cadena corta inhibidores del proceso de DA	30
Tabla 4. Parámetros medidos para el seguimiento del proceso de CoDA	31
Tabla 5. Caracterización de los sustratos	32
Tabla 6. Parámetros para evaluar la estabilidad de la CoDA en el BD	34

Lista de figuras

Figura 1. Cadena productiva del café	12
Figura 2. Etapas del beneficio húmedo del café	17
Figura 3. Etapas metodológicas para la evaluación de la CoDA de los residuos de café y EB...	24
Figura 4. Esquema del proceso anaerobio en un BD de bajo costo.....	25
Figura 5. Esquema de las fases de alimentación progresiva del BD en la finca <i>Villa Tarazona</i> .	25
Figura 6. Seguimiento del pH en el biodigestor	35
Figura 7. Seguimiento de los AGV y la capacidad buffer en el efluente del BD	36
Figura 8. Composición relativa y concentración total de los AGV	37
Figura 9. Evolución del contenido de metano durante la CoDA de los residuos de café con EB	39
Figura 10. Evolución del GA en el biodigestor para la CoDA de los residuos de café con EB ..	41
Figura 11. Remoción de la materia orgánica para la CoDA de los residuos de café con EB	43
Figura 12. Seguimiento de los sólidos volátiles en el afluente y efluente del BD.....	45

Glosario

AGV: Ácidos grasos volátiles

AM: Aguas mieles

BD: Biodigestor

CoDA: Co-digestión anaerobia

DQO: Demanda química de oxígeno

DA: Digestión anaerobia

EB: Estiércol bovino

GA: Grado de acidificación

PBM: Potencial bioquímico de metano

P: Pulpa de café

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

TRH: Tiempo de retención hidráulico

VCO: Velocidad de carga orgánica

Resumen

Título: Evaluación del proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino en un biodigestor bajo condiciones reales en una finca cafetera*

Autor: Karina Paola Jaimes Cogua, Claudia Jimena Pachón Rodríguez**

Palabras Clave: Co-digestión anaerobia, residuos de café, biodigestor a escala doméstica.

Descripción: Este estudio evaluó el proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino, al implementar una dieta sinérgica previamente estudiada a escala laboratorio y compuesta por 50AM:25P:25EB %SV, en un biodigestor de bajo costo a escala doméstica, con un volumen de 6 m³ que opera con una velocidad de carga orgánica de 0,5 kg m⁻³d⁻¹, instalado en una finca caficultura en Piedecuesta (Santander). Durante la evaluación se determinó la estabilidad del proceso de co-digestión anaerobia mediante indicadores de inhibición (AGV, AGV/AT, ratio CH₄/CO₂, grado de acidificación), al igual que se analizó la eficiencia del proceso mediante el monitoreo de la remoción de materia orgánica. Los resultados evidenciaron que el biodigestor presentó un desequilibrio metabólico entre la generación y consumo de AGV. No obstante, este no alcanzó condiciones de inhibición irreversible, permitiendo la adaptación progresiva del consorcio microbiano. Adicionalmente, el sistema presentó remociones de la materia orgánica sobre el rango recomendado por la literatura. Por lo tanto, la co-digestión anaerobia bajo la mezcla sinérgica es un proceso estable y eficiente para su operación a largo plazo. No obstante, el digerido obtenido en este proceso presenta una carga orgánica elevada que impide el cumplimiento de los límites establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para su vertimiento en cuerpos hídricos, lo cual indica la necesidad de un tratamiento posterior para su adecuada disposición.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Liliana del Pilar Castro Molano. Ingeniera Química, PhD. Co-directores: Humberto Escalante Hernández. Ingeniero Químico, PhD. Maria Paula Garay Jácome. Ingeniera Química, M.Sc.

Abstract**Title:**

Evaluation of the anaerobic co-digestion process of coffee waste (pulp and coffee wastewater) with cattle manure in a biodigester under real operating conditions on a coffee farm*

Authors:

Karina Paola Jaimes Cogua, Claudia Jimena Pachón Rodríguez**

Keywords:

Anaerobic co-digestion, coffee waste, household-scale biodigester.

Abstract:

This study evaluated the anaerobic co-digestion process of coffee residues (pulp and coffee wastewater) with cattle manure by implementing a synergistic mixture previously studied at laboratory scale, composed of 50AM:25P:25CM %VS, in a low-cost household-scale biodigester with a volume of 6 m³, operating at an organic loading rate of 0.5 kg m⁻³ d⁻¹, installed on a coffee farm in Piedecuesta (Santander). During the evaluation, process stability was determined through inhibition indicators (VFAs, VFA/TA ratio, CH₄/CO₂ ratio, and degree of acidification), while process efficiency was analyzed by monitoring organic matter removal. The results showed that the biodigester experienced a metabolic imbalance between the generation and consumption of VFAs. However, this did not reach irreversible inhibition conditions, allowing the progressive adaptation of the microbial consortium. Additionally, the system achieved organic matter removal efficiencies above the range recommended in the literature. Therefore, anaerobic co-digestion under the synergistic mixture is a stable and efficient process for long-term operation. However, the digestate obtained from this process presents a high organic load that prevents compliance with the limits established by the Ministry of Environment and Sustainable Development for discharge into water bodies, indicating the need for post-treatment prior to its proper disposal.

*Degree Work

**Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering.

Director: Liliana del Pilar Castro Molano. Chemical Engineer, PhD. Co-directors: Humberto Escalante Hernández. Chemical Engineer, PhD. Maria Paula Garay Jácome. Chemical Engineer, M.Sc.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Introducción

La industria cafetera constituye uno de los sectores más importantes para la economía colombiana, tanto por su contribución al crecimiento económico como por su impacto en el desarrollo rural (RAP, 2023). En términos macroeconómicos, el café representa el 21% del PIB agropecuario (Pinzón, 2026) y se posiciona como el tercer producto de exportación del país (Tabarquino et al., 2025). Asimismo, de acuerdo con la Federación Nacional de Cafeteros, el sector genera alrededor de 785.000 empleos directos, equivalentes al 26% del empleo agrícola nacional, consolidándose como un motor de desarrollo para la economía rural (Muñoz, 2014). En este sentido, la importancia económica y social del sector cafetero se sostiene a través de su cadena productiva, la cual está conformada por seis eslabones, tal como se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1.

Cadena productiva del café.



Nota. Adaptado de (Tabarquino et al., 2025)

Dentro de la cadena productiva del café, la etapa de producción representa un eslabón clave tanto en términos ambientales como de calidad. A nivel nacional, el café se procesa

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

tradicionalmente mediante el beneficio húmedo, donde el principal componente para la extracción del grano es el agua. Durante el procesamiento de la cereza de café, se generan como residuos una fracción sólida compuesta por pulpa (P), mucílago y pergamino, y una fracción líquida compuesta por las aguas de despulpado, comúnmente denominadas aguas mieles (AM). En términos generales, por cada kilogramo de grano de café procesado se generan alrededor de 0,7 kg de residuos sólidos (Tsigkou et al., 2025) y entre 40-45 L de residuos líquidos (Rodrigues et al., 2024).

En el caso de Colombia, existen alrededor de 658.000 fincas cafeteras, en su mayoría correspondientes a micro y pequeños productores (RAP, 2023), que anualmente generan cerca de 840.000 toneladas de grano de café verde, lo que origina aproximadamente 3 millones de toneladas de residuos al año (Rodríguez & Franco, 2010). Los residuos del café al no ser tratados adecuadamente generan impactos ambientales significativos, debido a la presencia de compuestos tóxicos que, al ser dispuestos sobre los suelos, pueden inhibir el crecimiento radicular de las plantas, incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero (Oliveira et al., 2025), propagar vectores de enfermedades que afectan a los humanos y provocar el agotamiento del oxígeno disuelto en cuerpos hídricos (Tsigkou et al. 2025).

Frente a la problemática anteriormente descrita, una alternativa para pequeños y medianos productores para el tratamiento de los residuos del café es la digestión anaerobia (DA), proceso bioquímico en el cual, la materia orgánica es degradada por acción de un consorcio microbiano en ausencia de oxígeno, produciendo biogás que puede ser utilizado como energía térmica debido a su alto contenido de metano (55-70% CH₄ y 45-30% CO₂) (Chanthong et al., 2024), así como una corriente líquida denominada digerido, un subproducto rico en nutrientes con potencial uso como biofertilizante (Selvankumar et al., 2017). De esta manera, la DA se destaca como la única

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

tecnología dentro de las energías renovables que produce un biocombustible (biogás) y simultáneamente, permite el tratamiento de residuos con una alta carga orgánica que no pueden ser vertidos directamente en los suelos (Neves et al., 2006).

Respecto a la DA de los residuos del café, la literatura solo reporta estudios a escala laboratorio (discontinuo o batch y semicontinuo) con un bajo desempeño, debido a la naturaleza lignocelulósica de los residuos, representada en un alto contenido de lignina (19-32%) (Sugebo, 2022). La lignina actúa como una barrera física ralentizando la hidrólisis del sustrato e inhibiendo el crecimiento y la adaptación de los consorcios microbianos presentes en la DA. Adicionalmente, los residuos del café se caracterizan por un bajo pH (Tsigkou et al., 2025), que aumenta el riesgo de inestabilidad en el proceso, al inhibir la actividad metanogénica y conducir a la acidificación del biodigestor (BD) (Jain et al., 2015). Con el propósito de superar las limitaciones anteriormente mencionadas, surge la co-digestión anaerobia (CoDA), alternativa que consiste en la digestión simultánea de dos o más sustratos con características complementarias (Xu et al., 2018). En este sentido, el estiércol bovino (EB) se presenta como un co-sustrato adecuado para los residuos del café, por su alto contenido de nitrógeno, su capacidad amortiguadora y su aporte de microorganismos anaerobios activos (Karki et al., 2021). De esta manera, el manejo conjunto de los residuos del café con EB, mediante CoDA representa una estrategia prometedora, debido a que permite equilibrar la relación carbono/nitrógeno (Alves et al., 2025), potenciar la actividad y diversidad microbiana (Chanthong et al., 2024), mejorar la estabilidad del pH, aumentar la producción de biogás y valorizar integralmente los residuos generados (Xu et al., 2018).

Estudios previos han demostrado que el uso de mezclas específicas de residuos de café en combinación con EB genera sinergias positivas entre co-sustratos. Por ejemplo, Guerrero &

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Ocampo, (2023) estudiaron la CoDA de los residuos del café con EB en operación discontinua (batch). Los autores reportaron una mezcla de 66AM:17P:17EB (en términos de sólidos volátiles) con efectos sinérgicos positivos entre los co-sustratos, alcanzando un incremento cercano al 91% en el potencial de biometanización (PBM) en comparación con la monodigestión de EB. Posteriormente, Armenta & Matiz, (2024) evaluaron la CoDA en operación semicontinua bajo dos velocidades de carga orgánica (VCO) (0,5 y 1,0 kg SV m⁻³·d⁻¹) utilizando la mezcla sinérgica reportada por Guerrero & Ocampo, (2023). Los resultados evidenciaron la viabilidad del proceso a una VCO de 0,5 kg SV m⁻³·d⁻¹, con una producción promedio de 3 NL biogás d⁻¹, mientras que al incrementar la carga a 1,0 kg SV m⁻³·d⁻¹, se observó inhibición del proceso debido a la acumulación excesiva de ácidos grasos volátiles (AGV) inhibidores como el ácido iso-butírico.

Con base en estos resultados, Crabiffosse (2024) evaluó la eficiencia de la CoDA de la Pulpa y Aguas mieles con estiércol bovino en un BD de bajo costo a escala doméstica, ubicado en una finca cafetera del municipio de Piedecuesta (Santander), implementando la mezcla sinérgica reportada por Guerrero & Ocampo, (2023). Si bien los resultados de este estudio mostraron un rendimiento aceptable de 0,15 Nm³ m⁻³digestor d⁻¹, estudios posteriores a escala laboratorio, demostraron que la mezcla sinérgica 66AM:17P:17EB %SV a una VCO de 0,5 kg SV m⁻³·d⁻¹, presentaba un alto riesgo de acidificación en su operación a largo plazo (Gómez & Rodríguez, 2025). Por tal motivo, el grupo de investigación INTERFASE evaluó a escala laboratorio una nueva relación de mezcla (50AM:25P:25EB, %SV), la cual presentó menor acumulación de AGV y mayor producción de biogás. En este contexto, el presente estudio busca responder a ¿cuál es el desempeño del proceso de co-digestión anaerobia de los residuos de café (Pulpa y Aguas Mieles) con Estiércol Bovino, bajo la mezcla 50AM: 25P:25 EB (%SV), en un biodigestor de bajo costo en una finca cafetera, con base en indicadores de estabilidad y remoción de la materia orgánica?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar el proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café (Pulpa y Aguas Mieles) con Estiércol Bovino en un biodigestor a escala doméstica en una finca cafetera.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la estabilidad del proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café (Pulpa y Aguas Mieles) con Estiércol Bovino en un biodigestor de bajo costo a escala doméstica, mediante el seguimiento de los indicadores de inhibición (concentración de ácidos grasos volátiles, capacidad buffer, pH, relación CH_4/CO_2 y grado de acidificación) al emplear una mezcla sinérgica compuesta por Aguas Mieles (50%), Pulpa de café (25%) y Estiércol Bovino (25%).
- Analizar la eficiencia del proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café (Pulpa y Aguas Mieles) con Estiércol Bovino mediante el monitoreo del consumo de la materia orgánica (sólidos volátiles y demanda química de oxígeno).

2. Marco conceptual

2.1. Beneficio del café

El método tradicional para el procesamiento del café es el beneficio húmedo, dado que permite obtener granos de mayor calidad (Woldesenbet et al., 2015). El proceso inicia con la *clasificación y selección* del fruto, seguido de la etapa de *despulpado*, en la cual se separa la Pulpa del grano. Posteriormente, los granos son sometidos a un proceso de *fermentación*, con el fin de degradar el mucílago adherido al grado. Luego de la fermentación, los granos se *lavan* para remover el mucílago remanente; las aguas residuales generadas durante la fermentación y lavado corresponden a las Aguas Mieles. Por último, se realiza la etapa de *secado*, en la cual, la humedad del grano se reduce desde aproximadamente 52 hasta 12%. (Aguilar-Rivera et al., 2014).

Figura 2.

Etapas del beneficio húmedo del café.



Nota. Adaptado de Hernández-Sarabia et al. (2021)

Se estima que, durante el beneficio húmedo del café, por cada kilogramo de café seco producido se generan en promedio 1,08 kg de P y 30 L de AM (Ponce et al., 2020). En respuesta al alto consumo de agua asociado a este proceso, Cenicafé ha desarrollado una estrategia de mitigación de impactos ambientales, denominada *Sistemas de Beneficio Ecológico*, que incluye

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

alternativas como Tanque Tina, Belcolsub y Ecomil, orientadas a la optimización del uso del recurso hídrico. De forma complementaria, Cenicafé también promueve prácticas de despulpado en seco (Cenicafé, 2015). No obstante, las AM generadas se caracterizan por presentar un alto contenido de azúcares de rápida fermentación y una demanda química de oxígeno (DQO) que puede alcanzar valores de hasta 50.000 mg L^{-1} , lo que dificulta su tratamiento mediante procesos biológicos (Hernández-Sarabia et al., 2021). Por su parte, la P contiene compuestos bioactivos, como proteínas y carbohidratos, que pueden favorecer la fermentación en los cuerpos de agua, además de la presencia de compuestos fenólicos que son de difícil degradación biológica (Serna-Jiménez et al., 2018). En consecuencia, estos residuos pueden generar impactos ambientales significativos si no son tratados correctamente. Por lo anterior, resulta necesario implementar alternativas de gestión y valorización de residuos que permitan un manejo eficiente con el fin de reducir su impacto ambiental y promover prácticas sostenibles entre los agricultores.

2.2. Digestión anaerobia

La DA es un proceso bioquímico mediante el cual la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno por acción de un consorcio microbiano, generando biogás como producto principal. El biogás obtenido es una mezcla de gases compuesta principalmente por metano (60%-70%), dióxido de carbono (30%-20%), y otros gases en menores cantidades como ácido sulfúrico y vapor de agua (Mantilla & Rojas, 2016). Además, la DA ofrece un subproducto de interés conocido como *digerido*, eficaz para el reciclaje de nutrientes en contextos agrícolas, incluyendo fincas cafeteras (Albarracin et al. 2024).

Los compuestos orgánicos disponibles para la DA se encuentran principalmente en forma de carbohidratos, lípidos y proteínas. Durante la hidrólisis, primera etapa del proceso de DA, estas

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

macromoléculas se degradan en sus respectivos monómeros: los carbohidratos en monosacáridos, los lípidos en ácidos grasos de cadena larga y glicerol, y las proteínas en aminoácidos y péptidos. Posteriormente, en la acidogénesis los compuestos hidrolizados se convierten en alcoholes y ácidos grasos de cadena corta, lo cuales, son denominados ácidos grasos volátiles (AGV) (Reyes Aguilera, 2017). No obstante, dado que los AGV compuestos con más de tres átomos de carbono no están disponibles como sustrato para los microorganismos metanogénicos, estos son transformados durante la acetogénesis en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Por último, en la metanogénesis, las arqueas metanogénicas actúan sobre los compuestos formados anteriormente para producir biogás como producto principal (Tiwari et al., 2021).

No obstante, con el fin de evitar la desestabilización del proceso de DA en operación semicontinua, es necesario el control de variables operativas tales como la VCO, el tiempo de retención hidráulico (TRH), la temperatura, la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el pH (Gómez & Rodríguez, 2025). La VCO corresponde a la cantidad de materia orgánica alimentada al BD por unidad de tiempo y volumen. Una VCO elevada puede provocar la acumulación de AGV, lo que conduce a la inhibición del BD y reduce la producción de metano (Grangeiro et al., 2019). El TRH, representa el tiempo que la materia orgánica permanece en el BD para su conversión en biogás, y se define como la relación entre el volumen del BD y el caudal de alimentación (Muthudineshkumar & Anand, 2018). En general, un mayor TRH (o de forma equivalente, una menor VCO) mejora la eficiencia del proceso, al proporcionar a los microorganismos un mayor tiempo para la degradación de los compuestos orgánicos (Jaimes-Estévez et al., 2024).

Asimismo, la DA requiere una temperatura adecuada para mantener la actividad microbiana, desempeñando un papel crucial en las tasas de hidrólisis y metanogénesis.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Temperaturas inferiores a 20°C pueden ralentizar significativamente el proceso y reducir la producción de biogás. De igual manera, la eficiencia del proceso puede verse afectada debido a que una relación C/N alta, limita el suministro de nitrógeno, mientras que, una relación C/N baja puede inhibir la actividad de los microorganismos metanogénicos debido a la presencia de amoníaco (Yao et al., 2020). Finalmente, un adecuado funcionamiento del BD se asocia con valores de pH entre 6,5 y 8,5 (Kumar & Samadder, 2020). Dado que, cuando el pH desciende por debajo de 6, se favorece la producción de hidrógeno, mientras que el mayor rendimiento de biogás se obtiene con un pH de 7 (Muthudineshkumar & Anand, 2018).

2.3.Co-digestión anaerobia

La Co-digestión Anaerobia (CoDA) es una estrategia que permite tratar simultáneamente dos o más sustratos, lo que favorece el equilibrio de nutrientes, genera efectos sinérgicos derivados de las contribuciones de cada co-sustrato, y permite una mayor carga de materia orgánica biodegradable (Guerrero et al., 2016). Para evaluar la sinergia entre los co-sustratos, se emplea el potencial de biometanización (PBM), el cual se define como la capacidad de biodegradabilidad anaerobia de un sustrato o mezcla de estos, y se expresa en términos del volumen de metano acumulado por unidad de materia orgánica (Holliger et al., 2016).

La CoDA mejora la estabilidad y rendimiento del proceso debido a que permite: *i*) Mitigar el efecto inhibitorio de los compuestos potencialmente tóxicos, *ii*) Aumentar la producción de biogás, gracias a la mayor capacidad buffer aportada por residuos ricos en proteínas, *iii*) Ajustar el contenido de humedad, al combinar sustratos con alto y bajo nivel de humedad *iv*) Enriquecer la comunidad microbiana anaerobia, ya que el estiércol animal aporta microbiota que permite ampliar el espectro de microorganismos que participan en el proceso de degradación (Esposito et al., 2012).

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

En el caso de los residuos del café, el elevado contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa presentes en la P dificulta su hidrólisis y reduce la disponibilidad de materia orgánica soluble (Gómez et al., 2021). De igual manera, el bajo pH de la P (4,3-5,1) y de las AM (2,4-4,4) (Tsigkou et al. 2025), sumado a la elevada producción de AGV de estas últimas, puede inhibir la actividad microbiana (Gómez & Rodríguez, 2025). En consecuencia, el tratamiento individual de estos sustratos no es recomendable en términos del rendimiento del proceso (Armenta & Matiz, 2024). En este contexto, la CoDA de la P y AM con EB se presenta como una alternativa para mejorar el rendimiento del proceso frente a la monodigestión, debido a que el pH alcalino del EB neutraliza la acidez asociada a la P y AM, aportando estabilidad al proceso (Acosta et al., 2021) además de contribuir con nitrógeno y una amplia gama de nutrientes esenciales (Pinto et al., 2023).

3. Estado del arte

Residuos como la P, el mucílago y las AM han sido estudiados como sustratos para la producción de biogás mediante DA, debido a su alto contenido de materia orgánica. En el tratamiento anaerobio de la P, Chala et al., (2018), reportaron un PBM de 244 L CH₄ kg SV⁻¹. De manera similar, Albarracín et al. (2024) evaluaron el mucílago de café, obteniendo un PBM de 295 L CH₄ kg SV⁻¹, mientras que la mezcla entre mucílago y la P resultó en un PBM de 314 L CH₄ kg SV⁻¹ (Tsigkou et al. 2025).

Respecto al tratamiento en conjunto de estos residuos, Rojas (2015) evaluó a escala laboratorio en un reactor semicontinuo la producción de biogás de una mezcla de 90% mucílago, 3% P y 7% AM (% m/m), a partir de la cual, obtuvo una producción de biogás de 810 L kg SV⁻¹ con un contenido de CH₄ del 68%. Aunque el autor obtuvo resultados favorables, la producción de biogás a partir de los residuos de café, enfrenta limitaciones operativas asociadas al riesgo de

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

acidificación por el bajo pH de los residuos, así como por la limitada disponibilidad de estos durante el periodo fuera de temporada (Mateus et al., 2020). Por lo cual, para contrarrestar estas limitaciones, se ha explorado la CoDA entre los residuos del café y el EB, por ejemplo, Corro et al., (2013) reportaron un rendimiento aproximado de 230 L de biogás kg SV^{-1} con una calidad de cercana al 60% para la CoDA binaria de la P y EB a escala laboratorio en un reactor batch.

Teniendo en cuenta que la literatura no reporta estudios sobre la CoDA de los residuos de café (P y AM) con EB, el grupo de investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad Energética (INTERFASE) evaluó la sinergia entre estos co-sustratos mediante un diseño de mezclas, considerando las interacciones binarias y ternarias entre estos residuos. En este contexto, Guerrero y Ocampo, (2023) evaluaron a escala batch, el PBM de la CoDA entre la P y AM con EB. Los autores reportaron que la mezcla 66AM:17P:17EB (%SV) presentó el mayor PBM ($629 \pm 9 \text{ NL CH}_4 \text{ kg SV}^{-1}$), junto con una remoción de materia orgánica del 60%. Asimismo, esta mezcla presentó una sinergia positiva entre los sustratos, lo que permitió reducir la acumulación de AGV y un incremento aproximado de la producción de biogás en un 11% y 91% respecto a la monodigestión de AM y EB, respectivamente.

No obstante, para implementar el proceso de CoDA a escala rural, es fundamental evaluar su operación en sistemas semicontinuos a escala laboratorio, dado que permite analizar variables que no pueden ser estudiadas en ensayos batch, tales como el TRH y la VCO, lo cual proporciona información sobre la estabilidad y viabilidad del proceso (Gómez & Rodríguez, 2025).

Con base en lo anterior, Armenta & Matiz, (2024) y Gómez & Rodríguez, (2025) evaluaron la mezcla 66AM:17P:17EB (%SV) en BD tubulares operados en semicontinuo, con el objetivo de determinar una VCO adecuada para la estabilidad del proceso. En el estudio de Armenta & Matiz,

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

(2024) se evaluaron VCO de 0,5 y 1,0 kg SV m⁻³d⁻¹, mientras que Gómez & Rodríguez, (2025) evaluaron VCO de 0,5 y 0,75 kg SV m⁻³d⁻¹. En ambos estudios, la VCO de 0,5 kg SV m⁻³d⁻¹ permitió una operación estable del BD, mientras que las VCO más elevadas condujeron a la inhibición del proceso antes de finalizar el primer TRH.

No obstante, durante el segundo TRH, bajo la VCO de 0,5 SV m⁻³·d⁻¹, Gómez & Rodríguez, (2025) reportaron inestabilidad en el proceso de CoDA, asociada a la acumulación de compuestos inhibitorios, que impidió mantener la operación a largo plazo. En consecuencia, los autores recomendaron evaluar nuevas relaciones de mezcla, sugiriendo las proporciones 33AM:17P:50EB (%SV) y 54AM:17P:29EB (%SV), las cuales habían mostrado los mejores rendimientos durante la fase de adaptación del proceso.

Con base en estas recomendaciones, el grupo de investigación INTERFASE evaluó nuevamente la sinergia entre los co-sustratos (AM, P y EB) mediante nuevas proporciones de mezcla, considerando tanto interacciones binarias como ternarias. Como resultado, se determinó que la mezcla 50AM:25P:25EB %SV presentó efectos sinérgicos positivos, reflejados en una mayor producción de biogás y una reducción en la acumulación de AGV.

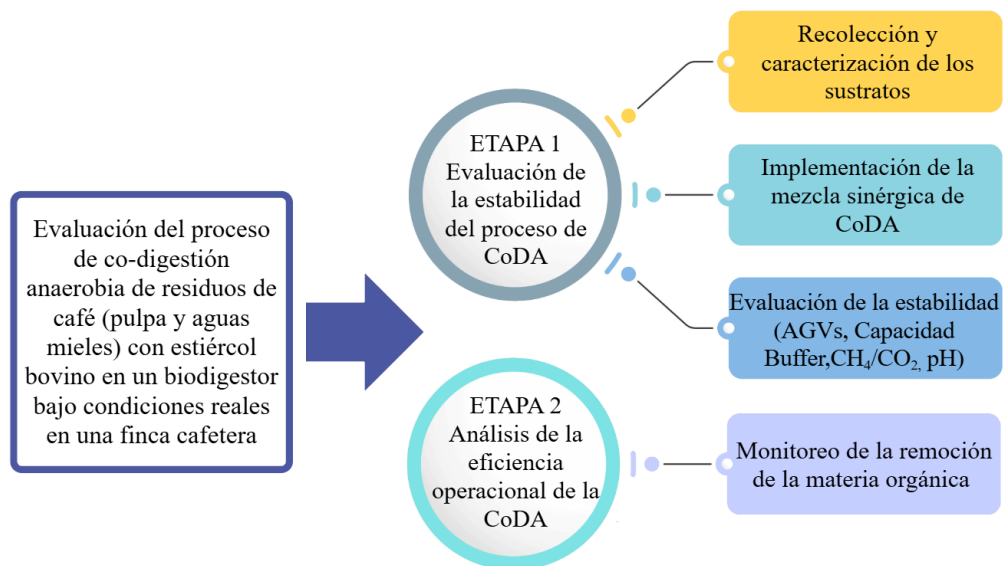
4. Metodología

Para el estudio de la mezcla de los co-sustratos pulpa y aguas mieles con estiércol bovino en un BD a escala doméstica, se empleó una metodología experimental desarrollada mediante dos etapas como se muestra en **Figura 3**. La primera correspondió a la evaluación de la estabilidad del proceso, y en la segunda etapa se analizó la eficiencia operativa de la CoDA.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Figura 3.

Etapas metodológicas para la evaluación de la CoDA de los residuos de café y EB.



4.1. Estabilidad del proceso de CoDA

4.1.1. Información del caso de estudio.

El estudio se llevó a cabo en una unidad productora de café “Villa Tarazona”, ubicada en el municipio de Piedecuesta, Santander, Colombia (latitud 6°57'20" N; longitud 72°59'14" O), a una altitud de 1.920 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 21°C. La unidad productiva se dedica a actividades agrícolas y cuenta con un área cultivada de 5.270 m², con una producción anual de 1.750 kg de grano de café seco. Como resultado del procesamiento del café mediante el método de beneficio húmedo, la finca genera alrededor de 85–90 L d⁻¹ de aguas mieles y 2–3 kg d⁻¹ de pulpa. En este contexto, y con el fin de gestionar adecuadamente los residuos, desde octubre de 2022 la finca dispone de un BD de polietileno de alta densidad, con un volumen de 6 m³ que opera bajo una VCO de 0,5 kg SV m⁻³d⁻¹ (Figura 4).

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Figura 4.

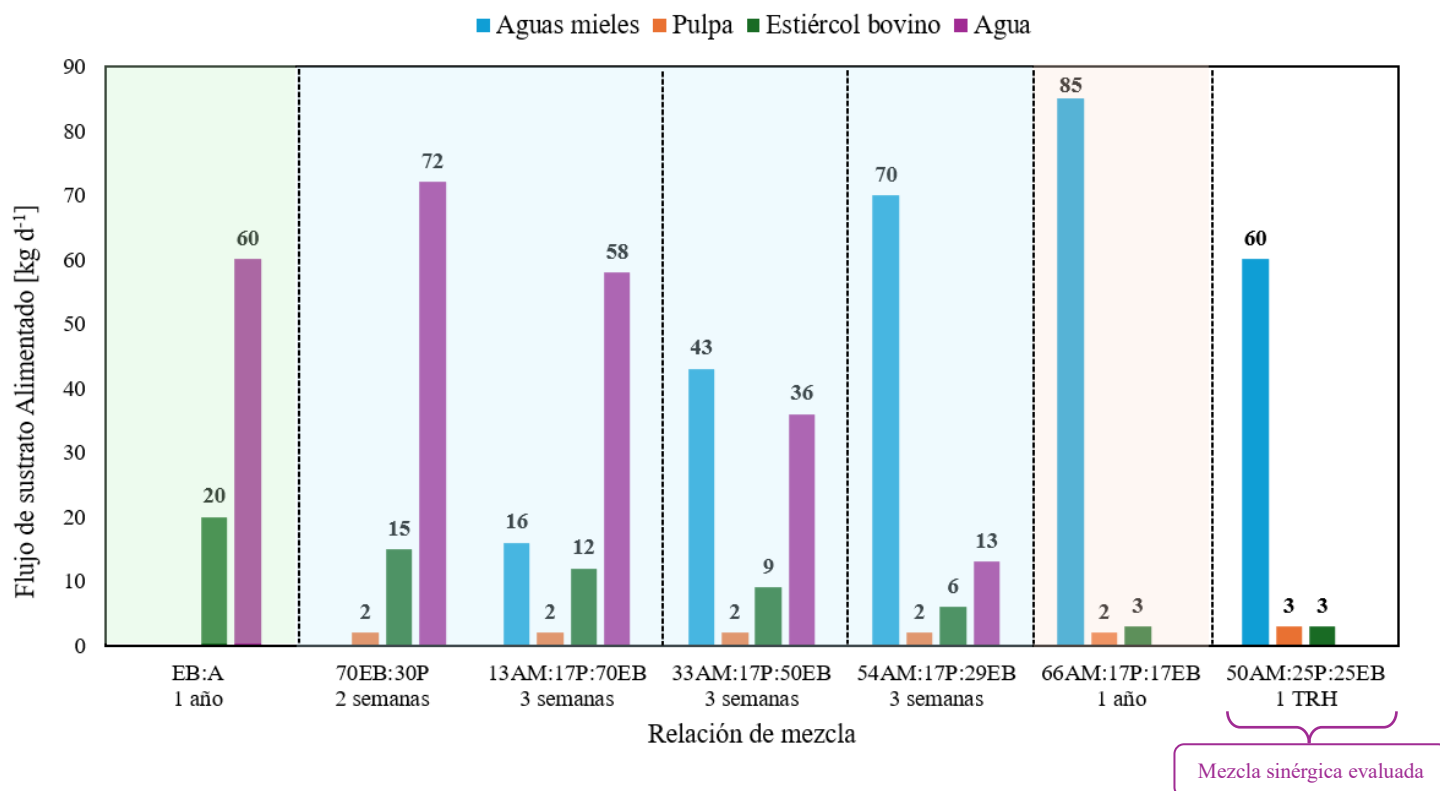
Esquema del proceso anaerobio en un BD de bajo costo.



Desde la implementación del BD en la finca, se estableció una estrategia de alimentación orientada a la adecuada operación con distintas mezclas de sustratos. En ese sentido, en la **Figura 5** se presenta el esquema operativo del BD desde su implementación en la finca.

Figura 5.

Esquema de las fases de alimentación progresiva del BD en la finca Villa Tarazona.



CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Nota. El eje de las abscisas se presentan las relaciones de mezcla evaluadas, y el eje de las ordenadas representa el flujo de alimentación, expresado en kg d^{-1} . Cada barra corresponde a los sustratos involucrados en la CoDA, indicando su contribución en términos de masa en la alimentación. Las Aguas Mieles (AM), la Pulpa (P), el Estiércol Bovino (EB) y el Agua (A) se identifican mediante barras de color azul, naranja, verde y morado, respectivamente. Adaptado de Crabiffosse, (2024).

En un principio, el BD fue alimentado con una mezcla de estiércol bovino y agua en una relación 1:3 (v/v), estrategia recomendada por Martí-Herrero & Cipriano (2012), debido a que garantiza un comportamiento hidráulico adecuado en BD de bajo costo y sin agitación, reduciendo el riesgo de sedimentación y obstrucción. Posteriormente, tal como se muestra en la franja azul de la **Figura 5**, se incorporaron de manera gradual los residuos de café, con el propósito de ajustar la alimentación del BD hacia los nuevos sustratos. En primer lugar, se implementó una CoDA binaria entre el estiércol bovino y la pulpa. Posteriormente, se inició la CoDA ternaria mediante la incorporación de aguas mieles, realizando ajustes secuenciales en la proporción de la alimentación, con el fin de incrementar la fracción de aguas mieles y reducir progresivamente el agua de dilución y el estiércol bovino. Este proceso se extendió por un periodo de tres meses, hasta alcanzar la mezcla reportada por Guerrero & Ocampo, (2023), correspondiente a 66AM:17P:17EB (%SV). Bajo dicha mezcla se eliminó el aporte de agua, y el BD mantuvo esta alimentación durante un periodo aproximado de un año.

De forma paralela, Gómez & Rodríguez, (2025) reportaron que la mezcla (66AM:17P:17EB), evaluada en un BD en operación semicontinua a escala laboratorio, presentó acumulación progresiva de compuestos inhibitorios en su operación a largo plazo. En consecuencia, con el fin de prevenir la inestabilidad y una eventual falla del BD, a partir de

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

septiembre del 2025 se alimentó con la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB (%SV), previamente evaluada a escala laboratorio, tanto en ensayos *batch* como en operación semicontinua.

4.1.2. *Recolección y caracterización de los sustratos.*

Los sustratos empleados fueron recolectados en la unidad productora de café “*Villa Tarazona*” en recipientes plásticos a temperatura ambiente. Posteriormente, los sustratos fueron transportados al Laboratorio de Biotecnología del Grupo de Investigación INTERFASE de la Universidad Industrial de Santander, donde se refrigeraron a 2°C hasta su respectiva caracterización fisicoquímica, con el fin de minimizar procesos de degradación biológica previos al análisis. En la **Tabla 1** se presentan los parámetros seleccionados para la caracterización fisicoquímica de los sustratos.

Tabla 1.

Parámetros medidos para la caracterización fisicoquímica de los sustratos

Parámetro	Unidad	Método de medición	Fuente
ST	g kg ⁻¹	Gravímetro (SM 2540-E)	(APHA, 2005)
SV	g kg ⁻¹	Gravimétrico (SM 2540-E)	(APHA, 2005)
DQO	gDQO L ⁻¹	Colorimétrico (SM 5220-D)	(APHA, 2005)
AGV	gCH ₃ COOHL ⁻¹	Titulación	(Purser et al., 2014)
pH	-	Potenciómetro (NTC 4888)	(APHA, 2005)
Alcalinidad total (AT)	g CaCO ₃ L ⁻¹	Titulación	(Purser et al., 2014)

4.1.3. *Ajuste operativo para la implementación de la mezcla sinérgica.*

El BD ubicado en la unidad productora de café operó en semicontinuo, y la implementación de la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB se desarrolló en dos fases operativas.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

La primera fase correspondió a la evaluación del estado inicial del BD, durante la cual el sistema fue alimentado con la mezcla 66AM:17P:17EB. Esta fase tuvo como objetivo verificar que el BD se encontrara en condiciones operativas adecuadas antes de realizar el cambio en la alimentación. Para ello, se establecieron tres criterios de estabilidad, teniendo en cuenta los valores reportados en la literatura como óptimos para el adecuado desempeño del proceso: *i*) valores de pH entre 6,5 y 8,5 (Kumar & Samadder, 2020); *ii*) relación de AGV/AT (Capacidad Buffer) inferior a 0,4 y concentración de AGV inferior a 1,500 g L⁻¹ (Angelidaki et al., 2005, Zhao et al., 2025); y *iii*) contenido de metano en el biogás superior al 52% (Zhao et al., 2025). De esta manera, se aseguró que la evaluación del desempeño de la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB, no estuviera influenciada por condiciones de inestabilidad previa del sistema.

Una vez alcanzadas las condiciones anteriormente descritas, se dio inicio a la segunda fase operativa, con el fin de monitorear el comportamiento del sistema bajo una nueva condición de alimentación. En esta fase, el BD se alimentó con la relación de mezcla 45AM:45A:5P:5EB (%v/v), definida a partir de la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB (%SV), la cual bajo una VCO de 0,5 kg SV m⁻³ d⁻¹, resultó en un THR de 61 días, calculado a partir de la ecuación 1.

$$TRH [d] = \frac{\rho_{alimento}}{VCO \cdot \sum \frac{f_k}{[SV]_k}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde,

$\rho_{alimento}$ = Densidad del alimento [kg m⁻³]

VCO = Velocidad de Carga Orgánica [kg SV m⁻³_{op} d⁻¹]

f_k = Fracción del sustrato k en el alimento

$[SV]_k$ = Sólidos volátiles del sustrato k [g SV kg⁻¹]

k = Sustratos considerados (pulpa de café, aguas mieles, estiércol bovino).

4.1.4. Evaluación de la estabilidad.

Para evaluar la estabilidad del proceso de DA, se seleccionaron 4 indicadores de inhibición para la detección de fallas operativas. Estos fueron monitoreados quincenalmente durante las 2 fases de seguimiento del BD. Los parámetros evaluados incluyeron la concentración total de AGV, la relación AGV/AT, el pH y la relación CH₄/CO₂, los cuales han sido reportados en la literatura como indicadores del estado del proceso (Wu et al., 2019). Para cada uno de estos, la literatura establece valores umbral, por encima o fuera de los cuales puede presentarse inhibición del proceso. Los límites se resumen en la **Tabla 2**, junto con los métodos analíticos correspondientes.

Tabla 2

Límite de concentración para los indicadores de inhibición del proceso de DA.

Indicador	Unidad	Límite de concentración	Método de medición	Referencia
AGV	mgCH ₃ COOHL ⁻¹	<1.500	Titulación	(Søndergaard et al., 2015)
AGV/AT	mgCH ₃ COOH mgCaCO ₃ ⁻¹	<0,4	Titulación	(Callaghan et al., 2002)
pH	-	6,5-8,5	Potenciométrico (NTC 4888)	(APHA, 2005)
Relación CH ₄ /CO ₂	-	1,2-1,9	Cromatografía de gases (SRI 8610C)	(Angelidaki et al. 2011) (Li et al. 2017)

Adicionalmente, se realizó el seguimiento de los AGV individuales, los cuales han sido reportados en la literatura como indicadores clave del estado del proceso de DA (Sun et al., 2010). Por lo tanto, se monitorearon las concentraciones de ácido acético, propiónico, butírico, iso-butírico, valérico, iso-valérico y caproico, siguiendo el método propuesto por Raposo et al., (2013), empleando un cromatógrafo de gases Agilent 7820A equipado con un detector de ionización de llama (FID). Los límites de concentración reportados para cada AGV se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3.*Límites de concentraciones de ácidos de cadena corta inhibidores del proceso de DA.*

Indicador	Unidad	Límite de concentración	Fuente
Ácido acético	mg L ⁻¹	< 800	(Hill et al., 1987)
Ácido propiónico	mg L ⁻¹	< 80	(Li et al., 2017)
Ácido butírico	mg L ⁻¹	< 10	(Li et al., 2017)
Ácido isobutírico	mg L ⁻¹	< 5	(Hill & Holmberg, 1988)
Ácido valérico	mg L ⁻¹	< 51	(Nielsen et al., 2007)
Ácido isovalérico	mg L ⁻¹	< 5	(Hill & Holmberg, 1988)
Ácido caproico	mg L ⁻¹	< 232	(Z. Li et al., 2024)

4.1.5 Grado de acidificación del biodigestor

Con el fin de cuantificar el estado de acidificación del BD y analizar su influencia sobre la estabilidad del proceso de DA, se calculó el grado de acidificación (GA) a partir de la relación entre la materia orgánica solubilizada (DQO_s) y los AGV producidos, de acuerdo con la ecuación 2 propuesta por Cerdán et al., (2021):

$$GA [\%] = \frac{DQO_{AGV}}{DQO_s} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

La concentración de AGV se expresó en equivalente de DQO_{AGV}, obtenidas a partir de las concentraciones individuales de cada ácido y sus respectivos factores estequiométricos de conversión a DQO. Los factores para los ácidos acético, propiónico, butírico, valérico y caproico son: 1,07; 1,51; 1,81; 2,04 y 2,20, respectivamente (Alkaya & Demirer, 2011).

4.2. Análisis de la eficiencia operacional de la CoDA

4.2.1. Monitoreo de la remoción de la materia orgánica.

La eficiencia operacional del proceso de CoDA se evaluó a partir del consumo de la materia orgánica alimentada al proceso, mediante la cuantificación de la DQO y los SV en el afluente y efluente del BD (Meegoda et al., 2018). La DQO representa la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de la materia orgánica presente (Raposo et al., 2008), mientras que los SV corresponden a la fracción biodegradable que es consumida durante el proceso de DA (Aguilar et al., 2024). Estos parámetros se cuantificaron de forma quincenal a lo largo de las 2 fases de monitoreo, empleando los métodos que se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4.

Parámetros medidos para el seguimiento del proceso de CoDA

Parámetro	Unidad	Método de medición	Fuente
SV	g kg^{-1}	Gravimétrico (SM 2540-E)	APHA, 2005
DQO	gDQO L^{-1}	Colorimétrico (SM 5220-D)	APHA, 2005

Asimismo, la remoción de la materia orgánica constituye un indicador directo del desempeño del proceso de DA, dado que un proceso eficiente debe alcanzar una remoción igual o superior al 30%, mientras que valores inferiores indican acumulación de materia orgánica y posible inestabilidad del proceso (Angelidaki et al., 2011).

El porcentaje de remoción se calculó como la relación entre la materia orgánica removida y la materia orgánica alimentada, tal como se muestra en la ecuación 3 (Beyene et al., 2014)

$$\text{Remoción [\%]} = \frac{C_{\text{Afluyente}} - C_{\text{Efluyente}}}{C_{\text{Afluyente}}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde,

$C_{\text{Afluyente}}$ = Concentración de la DQO en al afluente del BD [mgDQO L⁻¹]

$C_{\text{Efluyente}}$ = Concentración de la DQO en al efluente del BD [mgDQO L⁻¹]

5. Resultados

5.1. Estabilidad del proceso de Co-Digestión Anaerobia

5.1.1. Caracterización de los sustratos

En la **Tabla 5** se presenta la caracterización fisicoquímica de los sustratos empleados, con el fin de conocer sus propiedades iniciales. En particular, los SV permitieron definir los flujos de alimentación de cada sustrato, con base en lo establecido en la mezcla (50AM:25P:25EB, %SV).

Tabla 5

Caracterización de los sustratos.

Parámetro	Unidad	Sustrato		
		Pulpa	Aguas Mieles	Estiércol Bovino
SV	gkg ⁻¹	143,80±4,74	17,02±1,29	158,76±3,50
SV/ST	-	0,89±0,04	0,91±0,09	0,82±0,02
DQO	gDQO L ⁻¹	-	35,50±1,41	31,17±0,24
AGV	mgCH ₃ COOH L ⁻¹	-	3.516±0,08	1.314±0,04
pH	-	4,3	3,9	7,5
AT	gCaCO ₃ L ⁻¹	-	1,125±0,04	1,275±0,01

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

La pulpa es un sustrato con alto contenido de materia orgánica biodegradable, dado que presenta una relación SV/ST del 89%. En sustratos orgánicos, valores de SV/ST superiores al 50% se consideran indicativos de una elevada fracción orgánica disponible para la biodegradación (Aguilar et al., 2024). De igual manera, las aguas mieles presentan una alta proporción de materia orgánica degradable, con una relación SV/ST del 91%, debido a que están compuestas principalmente por azúcares reductores, cuya estructura simple las convierte en un sustrato susceptible a una rápida degradación y fermentación (Campos et al., 2021), lo cual se refleja en su elevado contenido de AGV ($3,516 \pm 0,084$ g $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$).

No obstante, tanto las aguas mieles (pH = 3,9) como la pulpa (pH = 4,3) presentan valores de pH inferiores al rango óptimo reportado en la literatura para la DA (6,5–8,5) (Kumar & Samadder, 2020), lo que puede representar una limitante operativa para la estabilidad del proceso. En este contexto, resulta necesario acondicionar el medio mediante la adición de un agente alcalinizante, que aporte la capacidad buffer requerida para neutralizar la acidez sin afectar el desempeño del proceso (Parra et al., 2015). Bajo este enfoque, el estiércol bovino se plantea como un co-sustrato adecuado para la CoDA anaerobia de los residuos de café (pulpa y aguas mieles), dado que su pH (7,5) y alcalinidad favorable ($1,275 \pm 0,007$ g $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) permiten balancear la carga acida del sistema (Grijalva & Gualatoña, 2019).

5.1.2. Ajuste operativo para la implementación de la mezcla sinérgica.

En la **Tabla 6** se presenta la caracterización del efluente del BD al inicio y al final de la primera fase de monitoreo, con base en los parámetros seleccionados como criterios de estabilidad para la implementación de la mezcla sinérgica (50AM:25P:25EB, %SV).

Tabla 6*Parámetros para evaluar la estabilidad de la CoDA en el BD.*

Parámetro	Unidades	Rango óptimo	Estado inicial Fase 1	Estado final Fase 1
pH	-	6,5-8,5	8,96 ± 0,01	8,11 ± 0,01
AGV	mg CH ₃ COOH L ⁻¹	< 1.500	324 ± 50,91	381 ± 13,22
AGV/AT	mg CH ₃ COOH mg CaCO ₃ ⁻¹	< 0,4	0,4 ± 0,02	0,31 ± 0,02
% CH ₄	-	> 52	68	68

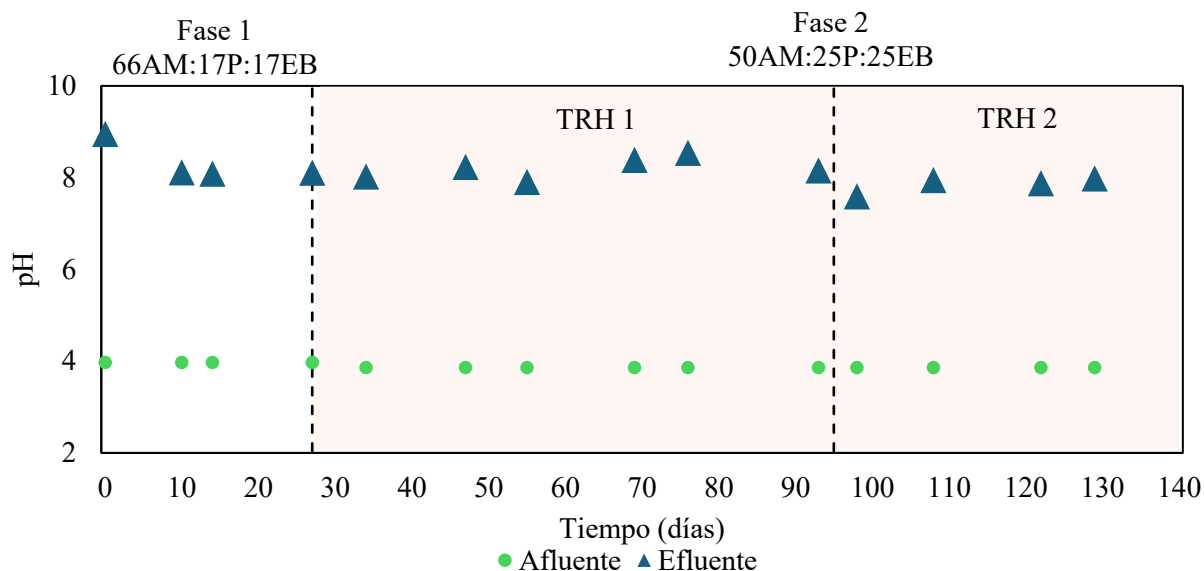
Los análisis realizados durante la primera fase de monitoreo evidenciaron que, al inicio del estudio, el BD presentaba un pH alcalino fuera del rango óptimo, condición que altera el equilibrio de la comunidad microbiana y reduce la eficiencia del proceso (B. Chen et al., 2024). En consecuencia, la alimentación del BD fue suspendida de manera temporal hasta alcanzar cada uno de los criterios definidos. Tras 28 días, el BD registro valores de AGV y capacidad buffer por debajo de los umbrales de 1.500 mg Ac. Acético L⁻¹ y 0,4 respectivamente. Asimismo, el pH se encontraba dentro del rango óptimo (8,11), lo que garantiza la actividad y eficiencia de los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica en biogás (Ferguson et al., 2016). De este modo, se garantizó el cumplimiento de cada uno de los criterios definidos para efectuar el cambio de alimentación y se procedió a implementar la mezcla 50AM:25P:25EB (%SV), iniciando la segunda fase de monitoreo.

5.1.3. Evaluación de la estabilidad del proceso de CoDA.

5.1.3.1 Monitoreo del pH y AGV en operación semicontinua

La **Figura 6** presenta la evolución del pH medido en el afluente y efluente del BD en el transcurso de las dos fases de monitoreo.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Figura 6*Seguimiento del pH en el biodigestor*

Durante las dos fases de monitoreo, el pH del afluente correspondiente a la alimentación del BD presentó un valor promedio de 3,86, mientras que el pH en el efluente se mantuvo estable dentro del intervalo 7,5-8,5. Este comportamiento evidencia que, a lo largo del periodo evaluado, el sistema presentó una capacidad de amortiguación, que permitió neutralizar la acidez de la alimentación y mantener a la salida del BD valores de pH dentro del rango considerado como adecuado para la DA (6,5-8,5) (Kumar & Samadder, 2020). La estabilidad en el pH del efluente se atribuye a la capacidad buffer del sistema, asociada principalmente a la presencia de estiércol bovino como co-sustrato amortiguador (Luo et al., 2018).

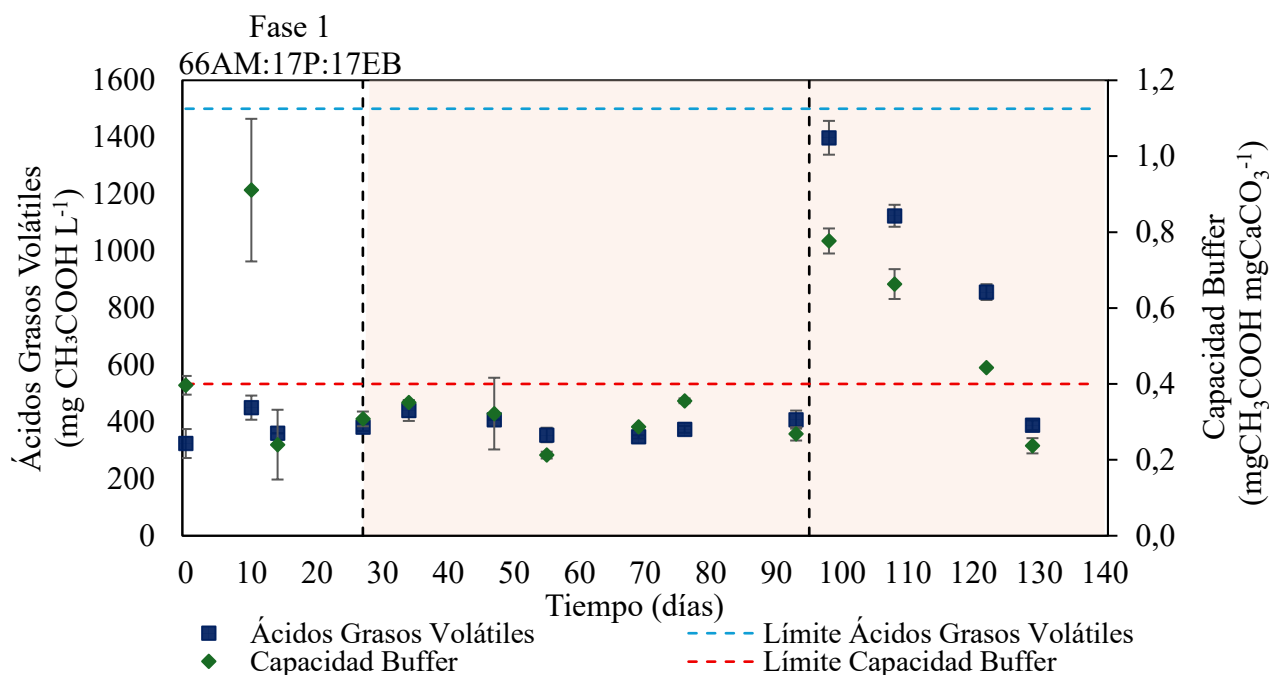
De manera complementaria, a lo largo del período de monitoreo se realizó el seguimiento tanto de la concentración de AGV como de la capacidad buffer, parámetros ampliamente utilizados como indicadores tempranos de inestabilidad en procesos de DA, debido a que permiten anticipar

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

desequilibrios metabólicos antes de que se manifiesten en el BD. En la **Figura 7** se presenta la evolución de estos parámetros.

Figura 7

Seguimiento de los AGV y capacidad buffer en el efluente del BD.



En la primera fase de operación y a lo largo del primer TRH de la segunda fase, las concentraciones de AGV se mantuvieron estables, oscilando en un intervalo entre 330 y 450 mg CH₃COOH L⁻¹. Este comportamiento evidencia que, en este periodo, no se presentó acumulación significativa de AGV, lo que indica un equilibrio entre la etapa productora de ácidos (acidogénesis) y las etapas consumidoras (acetogénesis-metanogénesis) (D. Li et al., 2017). No obstante, al inicio del segundo TRH, se evidenció un incremento significativo del 242% en la concentración total de AGV respecto a la última semana evaluada, alcanzando valores cercanos al umbral asociado a condiciones de inestabilidad del proceso. De manera consistente, la capacidad buffer mostró un comportamiento similar, manteniéndose estable durante la fase inicial y superando el valor de 0,4

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

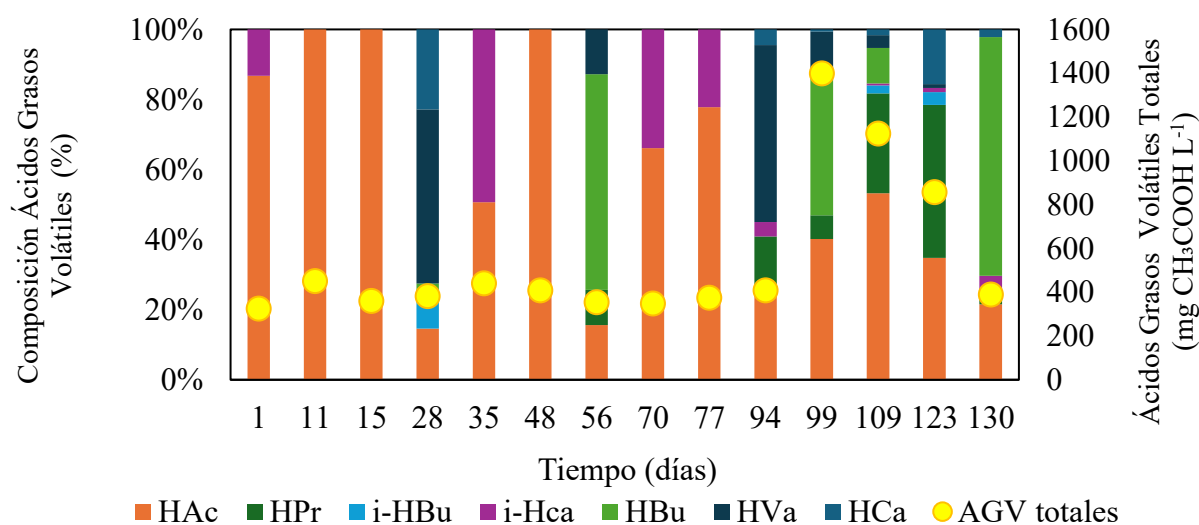
después del primer TRH, lo que evidencia un desequilibrio en el BD. Aun así, la capacidad buffer no sobrepasó el valor de 0,8, límite a partir del cual se ha reportado inhibición severa del proceso de digestión (Kameswari et al., 2012).

Posteriormente, en el transcurso del TRH 2, el sistema mostró una tendencia progresiva a la recuperación, reflejada en la disminución gradual de la concentración de AGV y de la capacidad buffer. Para el día 130 de monitoreo la concentración de AGV totales bajo a 388 mg CH₃COOH L⁻¹, y la capacidad buffer se redujo a 0,25. Los resultados obtenidos evidenciaron la resiliencia y capacidad de autorregulación del sistema bajo las condiciones evaluadas.

Teniendo en cuenta la concentración total de AGV, se realizó un seguimiento al perfil de AGV. Autores como Chen et al. (2020), han reportado que los AGV individuales permiten identificar oportunamente condiciones de inestabilidad, anticipar posibles fallas y prevenir la inhibición irreversible del sistema. En la **Figura 8** se presenta el seguimiento de las concentraciones individuales de los AGV en el efluente del BD a lo largo del tiempo de monitoreo.

Figura 8

Composición relativa y concentración total de los AGV



CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

En el transcurso de los primeros 94 días de monitoreo, el perfil de AGV evidenció un comportamiento estable debido a que las concentraciones individuales de cada ácido se mantuvieron en rangos bajos y sin acumulaciones. En este periodo, el ácido acético fue el ácido predominante y representó cerca del 56% de los AGV totales, lo cual es adecuado para el proceso de DA estable. Además, el acetato es el principal precursor para la metanogénesis y, por lo tanto, su presencia dominante se refleja en la producción de metano. No obstante, alrededor del día 99 se evidenció un cambio significativo en el patrón de AGV, caracterizado por un incremento en las concentraciones de ácido acético y ácido butírico. Aunque el ácido acético no superó el umbral de inhibición reportado en la literatura, su aumento indica un desequilibrio temporal entre la generación y consumo de intermediarios. En el caso del ácido butírico, su concentración alcanzó $114,38 \text{ mg L}^{-1}$, superando ampliamente el umbral de inestabilidad de 10 mg L^{-1} propuesto por Hill & Holmberg, (1988). Este hallazgo es relevante porque la acumulación de ácido butírico indica un desequilibrio metabólico en el BD (Cobb et al., 1991).

El comportamiento del BD durante el monitoreo refleja un desequilibrio metabólico asociado al cambio en la alimentación, debido a que la carga ácida aportada por la P y AM del café provoca una acidogénesis acelerada que desencadena en la acumulación de ácidos como el propionato, el butirato y el acetato, de manera que se afecta negativamente la oxidación sintrófica de los ácidos orgánicos de cadena corta, retardando su conversión en el proceso (Wu et al., 2022). A pesar de ello, a medida que los microorganismos responsables de la degradación de estos AGV se adaptaron a las nuevas condiciones del sistema, la conversión de los intermediarios se fue restableciendo gradualmente (Wu et al., 2022). Como resultado, el sistema mostró una recuperación progresiva, evidenciada por la disminución del ácido butírico y la estabilización del perfil de ácidos hacia una composición en la que nuevamente predomina el ácido acético. De esta

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

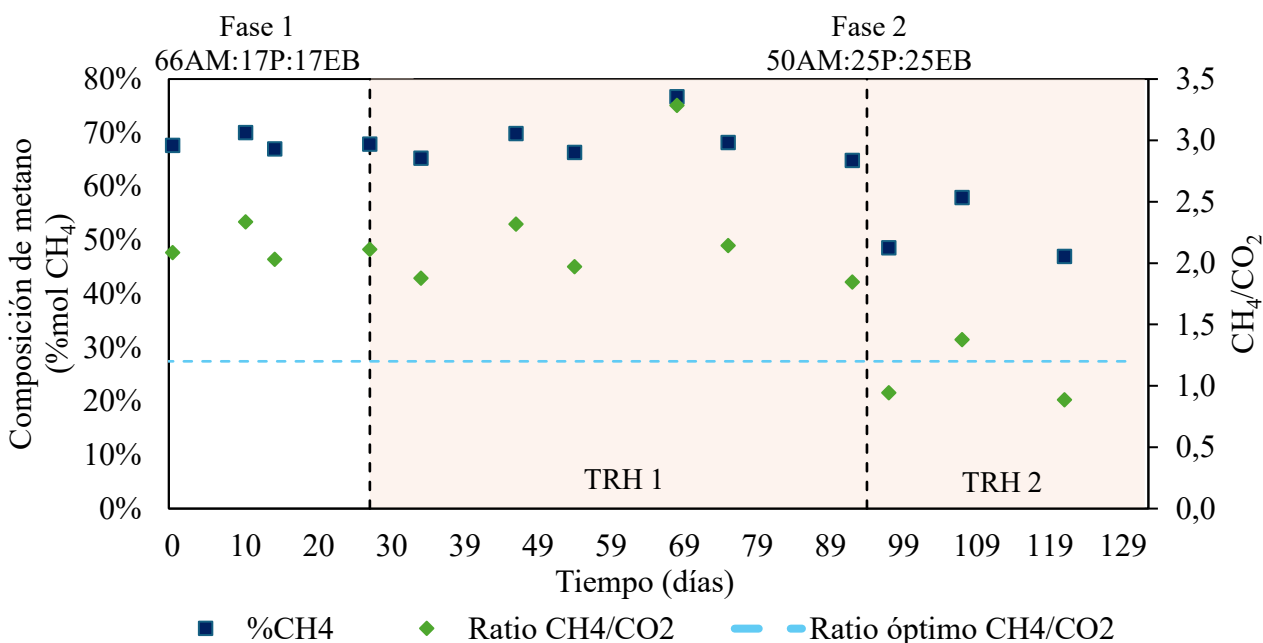
manera, hacia el día 130 se restableció el equilibrio entre la producción y el consumo de ácidos en el biodigestor.

5.1.3.2. Calidad del biogás producido

En la **Figura 9** se presenta la evolución del contenido de metano ($\%CH_4$) y de la relación CH_4/CO_2 , dos indicadores ampliamente utilizados para evaluar la estabilidad y el desempeño del proceso de DA.

Figura 9

Evolución del contenido de metano durante la CoDA de los residuos de café con EB.



Nota: El eje de las abscisas representa el tiempo de operación (días), mientras que el contenido de metano se representa mediante los marcadores azules en el eje de las ordenadas izquierdo, y la relación CH_4/CO_2 se indica con marcadores verdes en el eje de las ordenadas derecho.

Durante la primera fase, el contenido de metano se mantuvo constante, con un valor promedio cercano al 68%, lo que sugiere un desempeño metanogénico estable. Posteriormente,

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

tras el cambio en la alimentación del BD en la fase 2 (50AM:25P:25EB), en los primeros días se observó un comportamiento similar, con una calidad del biogás superior al 52%, lo que, de acuerdo con la literatura, indica una operación estable del BD (Zhao et al., 2025).

Sin embargo, al cumplirse el primer TRH de esta fase, en el día 99 de operación el sistema tuvo una disminución en la concentración de metano que afectó directamente la relación CH_4/CO_2 , con una reducción de aproximadamente 26,5% en el contenido de metano y una relación CH_4/CO_2 cercana al 1,2. El descenso en los parámetros evaluados indica un desequilibrio en el BD, reflejado en la reducción de la conversión de compuestos intermediarios a metano, lo cual es congruente con los resultados previamente expuestos en la sección *5.1.3.1 Monitoreo del pH y AGV en operación semicontinua*. Como resultado, la actividad metanogénica disminuye, lo que limita la producción de metano (L. Li et al., 2018). Este comportamiento concuerda con lo reportado por Regueiro et al. (2015), quienes, al someter el sistema a una variación en la alimentación, observaron acumulación de AGV, acompañada de una disminución tanto en la producción de biogás como en el contenido de metano. No obstante, el sistema mostro una tendencia a la recuperación, lo que sugiere una adaptación progresiva del consorcio microbiano hacia las nuevas condiciones del sistema (Deaver et al., 2020).

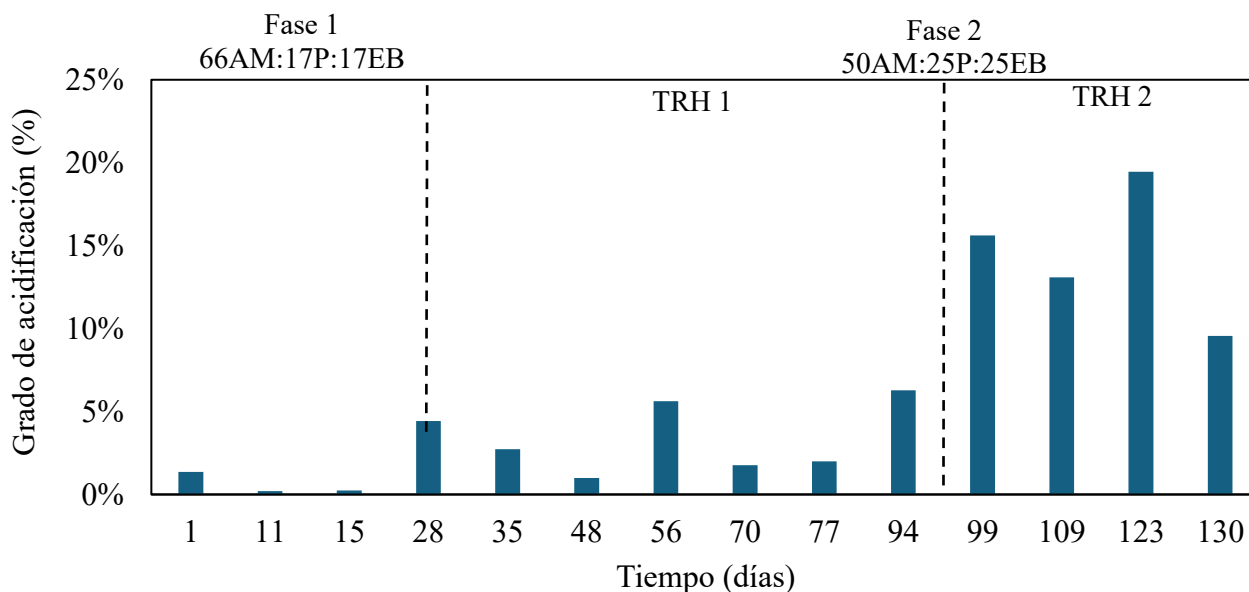
5.1.4 Grado de acidificación

La **Figura 10** presenta el GA del BD donde las ordenadas muestran la materia orgánica soluble transformada en AGV, mientras que las abscisas muestran el tiempo de operación.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Figura 10

Evolución del GA en el biodigestor para la CoDA de los residuos de café con EB



De acuerdo con los resultados que se presentan en la **Figura 10**, en el transcurso de la fase 1 el BD se mantuvo en condiciones operativas estables, registrando un grado máximo de acidificación del 4%, indicando una adecuada conversión de los metabolitos producidos en la etapa acidogénica, sin acumulación de AGV. Posteriormente, luego de la implementación de la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB, en la fase 2, el sistema continuó operando de manera estable durante el primer TRH, alcanzando un grado máximo de acidificación del 6%. Este comportamiento indica que, a pesar de la alta carga orgánica de los residuos de café, atribuida a su contenido de compuestos fácilmente fermentables que favorecen una rápida producción de AGV, el sistema mantiene un balance adecuado entre la generación y consumo de ácidos (Wainaina et al., 2019). En consecuencia, el BD logró mantener condiciones de estabilidad.

No obstante, al inicio del segundo TRH se evidenció un incremento significativo en el GA del BD, pasando de 6 a 16%, lo que sugiere un desequilibrio entre la producción y el consumo de

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

los ácidos generados en el proceso, el cual puede estar asociado a la presencia de material lignocelulósico en los sustratos, cuya naturaleza recalcitrante ralentiza la degradación de la materia orgánica y favorece la acumulación de productos intermediarios en el proceso de DA (Perimenis et al., 2018).

Finalmente, durante el segundo TRH el BD presentó una reducción global del GA, registrando un 10% hacia el final de este periodo (día 130), lo cual indica que la mezcla sinérgica implementada (50AM:25P:25EB) presenta las proporciones adecuadas para la operación del BD a largo plazo, aportando la capacidad buffer necesaria para contrarrestar la acidez generada por la acumulación de AGV, evitando descensos del pH y la inhibición de los microorganismos metanogénicos (Alavi-Borazjani et al., 2020). En consecuencia, se favorece el consumo de los AGV acumulados y el restablecimiento de la estabilidad del proceso.

5.2. Análisis de la eficiencia operacional de la CoDA.

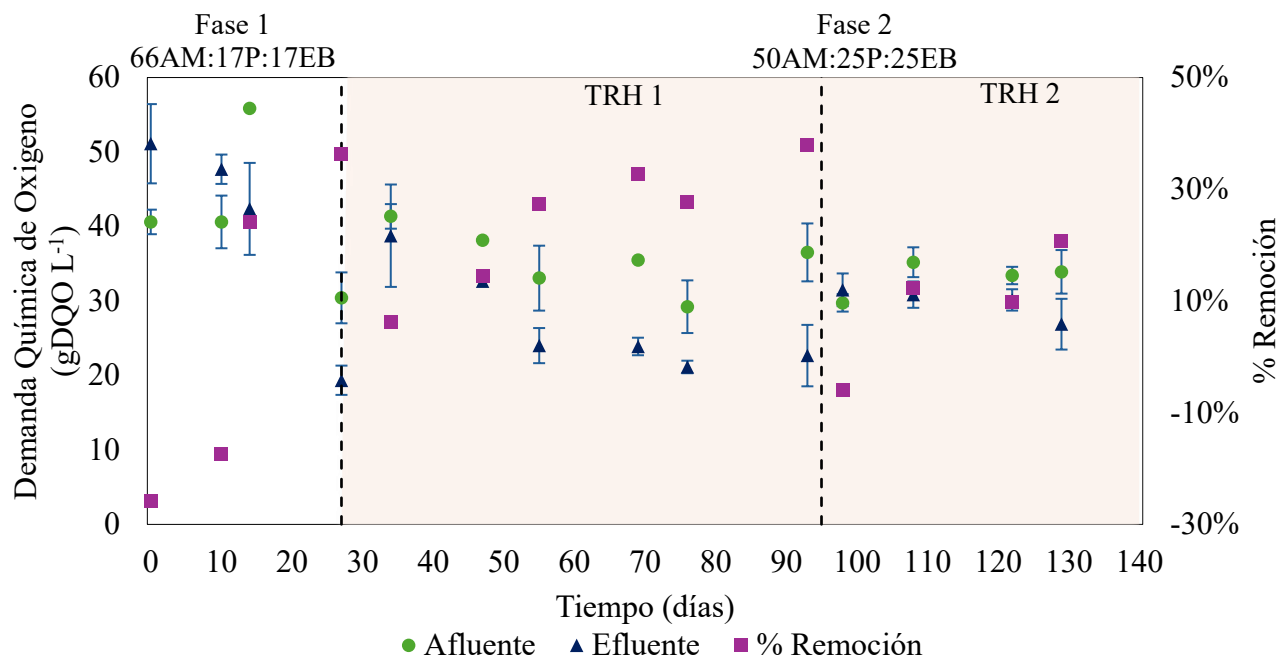
5.2.1 Remoción y dinámica de la demanda química de oxígeno.

La **figura 11** presenta la materia orgánica efectivamente degradada, expresada como porcentaje de remoción en términos de la DQO. n, se muestran los valores de la DQO en el afluente y efluente del BD durante el periodo monitoreado.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Figura 11

Remoción de la materia orgánica para la CoDA de los residuos de café con EB.



En la **figura 11** se observa que al inicio de la fase 1 la DQO en el efluente (55.833 mgDQO L⁻¹) registró un valor superior respecto al afluente (40.611 mgDQO L⁻¹), lo que demuestra una acumulación de materia orgánica en el sistema, reflejado en una remoción inferior al 30%, valor que, de acuerdo con Angelidaki et al. (2011) es indicativo de que el sistema de digestión presenta una saturación de materia orgánica. Además, los resultados a escala domestica coinciden con lo reportado por Gómez & Rodríguez, (2025), quienes evidenciaron reducción en la remoción de la materia orgánica en un BD semicontinuo a escala laboratorio al evaluar su operación a largo plazo, bajo la misma relación de mezcla (66AM:17P:17EB) con la que operaba el BD al inicio de la fase 1. En este contexto, y de acuerdo con lo previamente discutido en los resultados 5.1.2. *Ajuste operativo para la implementación de la mezcla sinérgica*, durante la fase 1 se suspendió temporalmente la alimentación al BD con el fin de favorecer la degradación de la materia orgánica.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Como resultado, hacia el final de esta fase, la remoción de la DQO superó el umbral del 30%, permitiendo implementar la mezcla sinérgica (50AM:25P:25EB, %SV).

Posterior a ello, al inicio del primer TRH, tras reanudar la alimentación al BD, se registró una disminución significativa en la remoción de la DQO pasando de 36% a 6%. No obstante, a lo largo de este periodo se evidenció un incremento progresivo en el consumo de la materia orgánica (aproximadamente 40%), que permitió registrar al final del primer TRH una remoción del 38%. Este comportamiento puede asociarse a la naturaleza de los sustratos, dado que, aunque las aguas mieles son fácilmente biodegradables y favorecen la remoción de la materia orgánica, la fracción lignocelulósica presente en la pulpa requiere mayores tiempos de retención para su degradación efectiva (Manyi-Loh & Lues, 2023).

De forma similar, al inicio del segundo TRH en el día 99 de monitoreo, se observó un descenso en la remoción de la DQO, sin embargo, en el transcurso de este periodo el sistema presentó una recuperación progresiva con un incremento aproximado del 15% en la remoción del contenido orgánico. Esta tendencia puede asociarse a la disminución de la DQO en el efluente, cuyos valores máximos fueron 41.354 mgDQO L⁻¹ y 35.200 mgDQO L⁻¹ durante el primer y segundo TRH respectivamente, como resultado de la reducción en la proporción de aguas mieles en la alimentación con la mezcla sinérgica. Lo anterior, es consistente con lo reportado por Tafur (2023), quien obtuvo valores de DQO de 20.317 mgDQO L⁻¹ en un proceso de CoDA de pulpa y aguas mieles con estiércol bovino, en un BD operado a escala rural al emplear una mezcla con menor proporción de aguas mieles y mayor dilución con agua (8AM:0,8P:25EB:66,2A %v/v). Si bien los valores de la DQO reportados por la autora son inferiores a los obtenidos en este estudio,

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

la tendencia observada confirma la influencia de la dilución de la mezcla sobre la DQO del efluente.

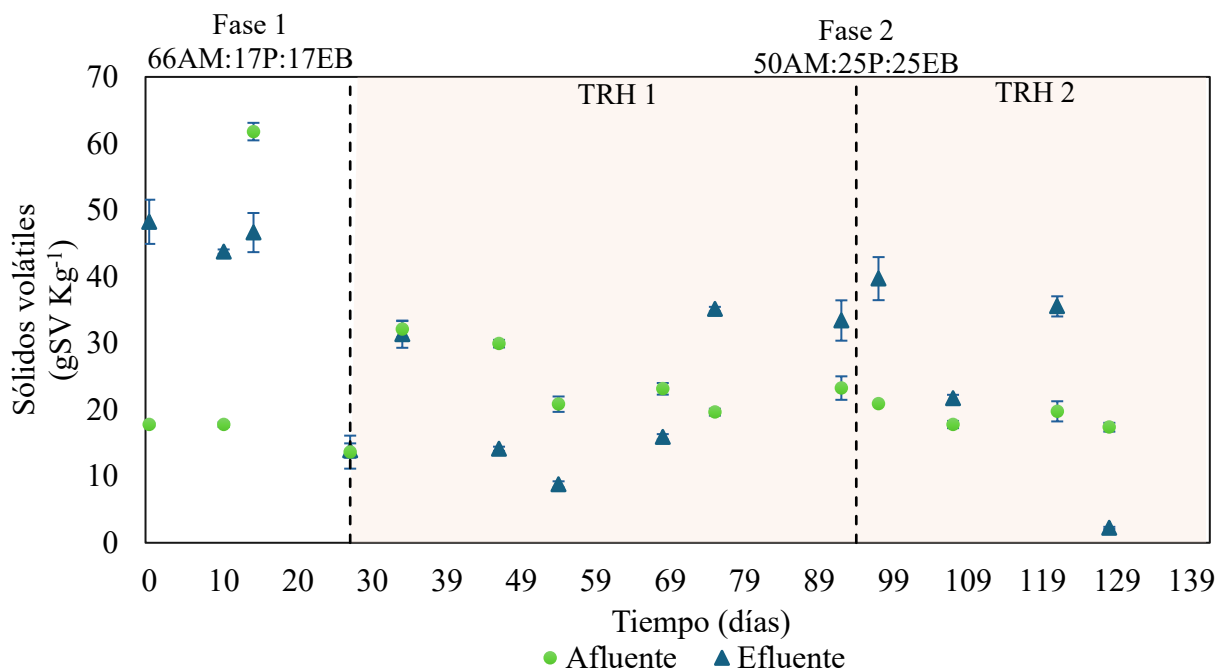
Finalmente, aunque la implementación de la mezcla sinérgica favoreció la disminución de la DQO en el efluente, los valores superan el límite permitido ($3.000 \text{ mgDQO L}^{-1}$) para vertimientos puntuales a cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado derivados del beneficio del café (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenibles, 2015). Por lo tanto, se requiere un postratamiento del efluente con el fin de reducir su carga orgánica.

5.2.2. Dinámica de los sólidos volátiles

En la **Figura 12** se presenta el comportamiento de los SV en el afluente y efluente del BD durante el periodo monitoreado.

Figura 12

Seguimiento de los sólidos volátiles en el afluente y efluente del BD



CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

En la **Figura 11** se observa que, durante la fase 1 los SV en el efluente mostraron un comportamiento descendente, asociado principalmente a la suspensión temporal de la alimentación al BD, lo cual redujo el ingreso de materia orgánica al sistema.

Posteriormente, en el transcurso del primer TRH, los valores de SV en el efluente mostraron una alta variabilidad, que impidió identificar una tendencia clara en la remoción de materia orgánica durante este periodo. De acuerdo Beyene et al., (2014) en procesos de DA, la reducción de la materia orgánica suele iniciar después de aproximadamente 10 días, alcanzando condiciones más estables tras 20 días de operación. No obstante, cuando se emplean residuos de café como sustrato, se requieren mayores tiempos de retención para que el proceso se estabilice, los cuales pueden tomar hasta 50 días. En este contexto, la ausencia de una tendencia definida en la remoción de SV a lo largo del primer TRH podría atribuirse al periodo de adaptación del sistema frente a la transición en la composición del alimento.

Finalmente, durante el segundo TRH se observó un aumento progresivo en la remoción de SV, registrando una remoción superior al 30%, lo que sugiere una adaptación gradual del sistema a la nueva mezcla sinérgica.

Conclusiones

- La mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB (%SV) es adecuada para el proceso de CoDA de AM y P de café con EB a escala real. Dado que, aunque durante el proceso de CoDA se presentó acumulación de AGV, la actividad metanogénica se mantuvo, lo cual se evidencia en la producción de metano.
- Adicionalmente, la adaptación progresiva del sistema a la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB (%SV) se evidenció en la disminución de la concentración de AGV hasta

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

388 mg $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$ y de la capacidad buffer a 0,25; hacia el final del tiempo de monitoreo.

- La CoDA de la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB (%SV) permitió obtener remociones positivas del contenido orgánico, superando el umbral recomendado para un proceso de CoDA eficiente. En particular, aunque la DQO en el efluente del BD no fue inferior al límite establecido para vertimientos en cuerpos de agua, se obtuvo una disminución del 36% en la DQO del efluente del BD.

Recomendaciones

Evaluar la calidad del digerido de la CoDA de la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB (%SV) mediante parámetros fisicoquímicos, debido a su alto contenido de materia orgánica, con el fin de determinar su potencial uso como biofertilizante o enmendador de suelos en fincas cafeteras.

Realizar un análisis energético y económico de la CoDA de la mezcla sinérgica 50AM:25P:25EB (%SV), estimando la producción de biogás en el biodigestor mediante herramientas de simulación como el modelo ADM1.

Referencias bibliográficas

- Acosta, N., Duh Kang, I., Rabaey, K., & De Vrieze, J. (2021). Cow manure stabilizes anaerobic digestion of cocoa waste. *Waste Management*, *126*, 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.010>
- Aguilar-Aguilar, F. A., Mena-Cervantes, V. Y., Ramírez-Estrada, A., & Hernández-Altamirano, R. (2024). Evaluation of the potential for bioenergy production from coyol fruit by anaerobic digestion. In *Innovative Applications in Sustainable Energy and Environment* (pp. 21–33). ECORFAN. <https://doi.org/10.35429/h.2024.13.21.33>
- Aguilar-Rivera, N., Houbron, E., Rustrian, E., Carlos, L., Ximhai, R.-A. R., & Ximhai, R. (2014). *PAPEL AMATE DE PULPA DE CAFÉ (Coffea arabica) (RESIDUO DE BENEFICIO HÚMEDO)*. *10*, 103–117.
- Alavi-Borazjani, S. A., Capela, I., & Tarelho, L. A. C. (2020). Over-acidification control strategies for enhanced biogas production from anaerobic digestion: A review. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 143). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105833>
- Albarracin, L. T., Mas, I. R., Fuess, L. T., Rodriguez, R. P., Volpi, M. P. C., & de Souza Moraes, B. (2024). The Bioenergetic Potential from Coffee Processing Residues: Towards an Industrial Symbiosis. *Resources*, *13*(2). <https://doi.org/10.3390/resources13020021>

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

- Alkaya, E., & Demirer, G. N. (2011). Anaerobic acidification of sugar-beet processing wastes: Effect of operational parameters. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.002>
- Alves Lourenço, V., Pereira Camargo, F., Kimiko Sakamoto, I., Silva, E. L., & Amâncio Varesche, M. B. (2025). Waste valorization through anaerobic co-digestion in coffee and swine farms: CH₄ yield optimization and farm-scale viability. *Bioresource Technology*, 415. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131667>
- Angelidaki, I., Boe, K., & Ellegaard, L. (2005). *Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants*.
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D. J., Plugge, C. M., & Stams, A. J. M. (2011a). Biomethanation and its potential. In *Methods in Enzymology* (Vol. 494, pp. 327–351). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0>
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D. J., Plugge, C. M., & Stams, A. J. M. (2011b). Biomethanation and its potential. In *Methods in Enzymology* (Vol. 494, pp. 327–351). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0>
- Baird, Rodger., Eaton, A. D. ., Rice, E. W. ., & Bridgewater, Laura. (2017a). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
- Baird, Rodger., Eaton, A. D. ., Rice, E. W. ., & Bridgewater, Laura. (2017b). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.

- Baird, Rodger., Eaton, A. D. ., Rice, E. W. ., & Bridgewater, Laura. (2017c). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
- Beyene, A., Yemane, D., Addis, T., Assayie, A. A., & Triest, L. (2014). Experimental evaluation of anaerobic digestion for coffee wastewater treatment and its biomethane recovery potential. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *11*(7), 1881–1886. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0339-4>
- Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., & Forster, C. F. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 27).
- Campos, R. C., Pinto, V. R. A., Melo, L. F., Rocha, S. J. S. S. da, & Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. In *Future Foods* (Vol. 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- Cerdán, J. M. A., Tejido-Nuñez, Y., Aymerich, E., de GoñiGoñi, J. G. M., & Garcia-Aguirre, J. (2021). A Comprehensive Comparison of Methane and Bio-Based Volatile Fatty Acids Production from Urban and Agro-Industrial Sources. *Waste and Biomass Valorization*, *12*(3), 1357–1369. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01093-3>
- Chala, B., Oechsner, H., Latif, S., & Müller, J. (2018). Biogas potential of coffee processing waste in Ethiopia. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(8). <https://doi.org/10.3390/su10082678>

- Chanthong, S., Kongjan, P., Jariyaboon, R., & O-Thong, S. (2024). Synergistic integration of hydrothermal pretreatment and co-digestion for enhanced biogas production from empty fruit bunches in high solids anaerobic digestion. *Heliyon*, *10*(15). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34817>
- Chen, B., Azman, S., Crauwels, S., Dewil, R., & Appels, L. (2024). Mild alkaline conditions affect digester performance and community dynamics during long-term exposure. *Bioresource Technology*, *406*, 131009. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2024.131009>
- Chen, L., Zheng, T., Cao, Q., Zhou, Y., Liu, X., & Li, D. (2020). Early warning of instability during mesophilic anaerobic digestion of chicken manure. *Applied Ecology and Environmental Research*, *18*(1), 331–343. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_331343
- Cobb, S. A., Hill, D. T., & Asae, A. (1991). *VOLATILE FATTY ACID RELATIONSHIPS IN ATTACHED GROWTH ANAEROBIC FERMENTERS*.
- Corro, G., Pal, U., Bañuelos, F., & Rosas, M. (2013). Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions. *Energy Conversion and Management*, *74*, 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.017>
- Crabiffosse, C. (2024). *Implementación del Proceso de digestión anaerobia en una finca cafetera en Colombia*.

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Crabiffosse Tartiere, C. (2024). *Implementación del proceso de digestión anaerobia en una finca cafetera en Colombia.*

David, S., & Romero, A. (n.d.). *CO-DIGESTIÓN DE AGUAS MIELES Y PULPA CON ESTIÉRCOL BOVINO 2 Dedicatoria.*

Dayana, E., Arévalo, G., Ocampo Díaz, S., & Jaramillo, J. G. (2023). *EFFECTOS SINÉRGICOS DE LA CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA I Efectos sinérgicos de la co-digestión anaeróbica de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino.*

De Hacienda, M., Público, C., Santamaría, M. C., Valencia, A. I., Fernando, J., Ortega, M., Alirio, J., Buitrago, B., Velez, E., Danilo, U., Vivas, R., Clifford, R., Bonilla, E., Javier Bohorquez Bohorquez, S., Oliveros, O., Rafael, C. E., Pineda, A., Javier, L., Sanchez, P., ... Orrego, H. D. (2015). *Beneficio del café en Colombia.*

de Oliveira Fernandes, M. A., Baêta, B. E. L., Adarme, O. F. H., & Fonseca, A. (2025). LCA-based carbon footprint analysis of anaerobic digestion of coffee husk waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114993>

Deaver, J. A., Diviesti, K. I., Soni, M. N., Campbell, B. J., Finneran, K. T., & Papat, S. C. (2020). Palmitic acid accumulation limits methane production in anaerobic co-digestion of fats, oils and grease with municipal wastewater sludge. *Chemical Engineering Journal*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125235>

Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. In *Reviews in Environmental Science and*

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Biotechnology (Vol. 11, Number 4, pp. 325–341). <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9277-8>

Ferguson, R. M. W., Coulon, F., & Villa, R. (2016). Organic loading rate: A promising microbial management tool in anaerobic digestion. *Water Research*, *100*, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.009>

Gómez Cantillo, S., & Rodríguez Mejía, B. (2025). *Evaluación de la estabilidad y la eficiencia operacional de la co-digestión anaerobia de los residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino en un biodigestor tubular a dos velocidades de carga orgánica.*

Gómez, S., & Rodríguez, B. (2025). *CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ 2 Dedicatoria.*

Gómez Salcedo, Y., Baquerizo Crespo, R., Da Silva, A. J., Oliva Merencio, D., & Pereda Reyes, I. (2021). Anaerobic digestion of solid wastes from coffee wet processing. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *37*, 281–292. <https://doi.org/10.20937/RICA.53753>

Grangeiro, L. C., Almeida, S. G. C. de, Mello, B. S. de, Fuess, L. T., Sarti, A., & Dussán, K. J. (2019). New trends in biogas production and utilization. In *Sustainable Bioenergy: Advances and Impacts* (pp. 199–223). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817654-2.00007-1>

Grijalva, M., & Gualatoña, M. (2019). *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL EVALUACIÓN DE LA*

EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN BIODIGESTORES TUBULARES CON ESTIÉRCOL BOVINO MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE TEMPERATURA Y CARGA ORGÁNICA. PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL MÓNICA DEL ROCÍO GUALOTUÑA SANMARTÍN.

- Hernández-Sarabia, M., Sierra-Silva, J., Delgadillo-Mirquez, L., Ávila-Navarro, J., & Carranza, L. (2021). The potential of the biodigester as a useful tool in coffee farms. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(15). <https://doi.org/10.3390/app11156884>
- Hill, D. T., Cobb, S. A., Bolte, J. P., & Asae, A. M. (1987). *Using Volatile Fatty Acid Relationships to Predict Anaerobic Digester Failure*.
- Hill, D. T., & Holmberg, R. D. (1988). Long Chain Volatile Fatty Acid Relationships in Anaerobic Digestion of Swine Waste*. In *Biological Wastes* (Vol. 23).
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016a). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, *74*(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016b). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, *74*(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

- Jaimés-Estévez, J., Castro, L., Escalante, H., & Martí-Herrero, J. (2024). Anaerobic digestion in cold climates. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-29210-1.00014-5>
- Jain, S., Jain, S., Wolf, I. T., Lee, J., & Tong, Y. W. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 52, pp. 142–154). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.091>
- Julio Guerrero, I. C., Peláez Jaramillo, C. A., & Molina Perez, F. J. (2016). Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos. *Revista ION*, 29(1), 63–70. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>
- Kameswari, K., Kalyanaraman, C., Porselvam, S., & Thanasekaran, K. (2012). Optimization of inoculum to substrate ratio for bio-energy generation in co-digestion of tannery solid wastes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(2), 241–250. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0391-z>
- Karin, B., Tafur, Y., Asesores, H., Gosgot, M. W., Jesús, A. M. S., & Barrios, R. (n.d.). *UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EMPLEANDO PULPA DE CAFÉ Y AGUAS MIELES.*

- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., Hashimoto, A., & Kumar Khanal, S. (2021). Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. In *Bioresource Technology* (Vol. 330). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2020). Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. In *Energy* (Vol. 197). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>
- Li, D., Chen, L., Liu, X., Mei, Z., Ren, H., Cao, Q., & Yan, Z. (2017a). Instability mechanisms and early warning indicators for mesophilic anaerobic digestion of vegetable waste. *Bioresource Technology*, 245, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.098>
- Li, D., Chen, L., Liu, X., Mei, Z., Ren, H., Cao, Q., & Yan, Z. (2017b). Instability mechanisms and early warning indicators for mesophilic anaerobic digestion of vegetable waste. *Bioresource Technology*, 245, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.098>
- Li, L., Peng, X., Wang, X., & Wu, D. (2018). Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability. In *Bioresource Technology* (Vol. 248, pp. 20–28). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.012>
- Li, Z., Qiu, S., Xu, J., & Ge, S. (2024). Effect of Undissociated n-Caproic Acid on Methanogen Activity and Subsequent Recovery: Methane Anabolism and Community

- Structure. *ACS ES and T Engineering*, 4(3), 706–716.
<https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00393>
- Luo, X., Yuan, X., Wang, S., Sun, F., Hou, Z., Hu, Q., Zhai, L., Cui, Z., & Zou, Y. (2018). Methane production and characteristics of the microbial community in the co-digestion of spent mushroom substrate with dairy manure. *Bioresource Technology*, 250, 611–620. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.088>
- Mantilla Avila, L. M., & Rojas Amaya, G. A. (2016). *IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR RURAL PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ESTIERCOL BOVINO EN LA FINCA MARCELLA LAURA MARCELA MANTILLA AVILA*.
- Manyi-Loh, C. E., & Lues, R. (2023). Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. In *Fermentation* (Vol. 9, Number 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/fermentation9080755>
- Martí-Herrero, J., & Cipriano, J. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology*, 108, 21–27.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.117>
- Mateus, S., Carvalheira, M., Cassidy, J., Freitas, E., Oehmen, A., & Reis, M. A. M. (2020). Two-stage anaerobic digestion system treating different seasonal fruit pulp wastes: Impact on biogas and hydrogen production and total energy recovery potential. *Biomass and Bioenergy*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105694>

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Matiz Ángel, D. J., & Armenta Romero, S. D. (2024a). *CO-DIGESTIÓN DE AGUAS MIELES Y PULPA CON ESTIÉRCOL BOVINO*.

Matiz Ángel, D. J., & Armenta Romero, S. D. (2024b). *CO-DIGESTIÓN DE AGUAS MIELES Y PULPA CON ESTIÉRCOL BOVINO*.

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Number 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenibles. (2015). *resolucion-631-de-2015*.

Muthudineshkumar, R., & Anand, R. (2018). Anaerobic digestion of various feedstocks for second-generation biofuel production. In *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* (pp. 157–185). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00006-1>

Neves, L., Oliveira, R., & Alves, M. M. (2006). Anaerobic co-digestion of coffee waste and sewage sludge. *Waste Management*, 26(2), 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.022>

Nielsen, H. B., Uellendahl, H., & Ahring, B. K. (2007). Regulation and optimization of the biogas process: Propionate as a key parameter. *Biomass and Bioenergy*, 31(11–12), 820–830. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.04.004>

Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., López, W., & Andrade, J. (2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

- de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 515–526. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.004>
- Perimenis, A., Nicolay, T., Leclercq, M., & Gerin, P. A. (2018). Comparison of the acidogenic and methanogenic potential of agroindustrial residues. *Waste Management*, 72, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.033>
- Pinto, J. A., Barros, R. M., dos Santos, I. F. S., Filho, G. L. T., de Oliveira Botan, M. C., Bôas, T. F. V., & de Cássia Crispim, A. M. (2023). Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. *Cleaner Waste Systems*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>
- Pinzón, M. (2026, January). “*El café pesa sobre 20,7% en la economía agropecuaria y 1,8% del PIB nacional.*”
- Ponce, O., Ponce, O., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), & Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe (RedBioLAC). (2020). *Biodigestor para tratamiento de aguas del procesamiento del café.*
- Purser, Fritz, T., Esteves, S. R., Dindale, R. M., & Guwy, A. J. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Research*, 61, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.020>
- RAP. (2023). *granjas cafeteras.*
- Raposo, F., de la Rubia, M. A., Borja, R., & Alaiz, M. (2008). Assessment of a modified and optimised method for determining chemical oxygen demand of solid substrates

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

and solutions with high suspended solid content. *Talanta*, 76(2), 448–453.

<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.03.030>

Regueiro, L., Lema, J. M., & Carballa, M. (2015). Key microbial communities steering the functioning of anaerobic digesters during hydraulic and organic overloading shocks.

Bioresource Technology, 197, 208–216.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.076>

Reyes Aguilera, E. A. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos.*

Rodrigues, C. V., Camargo, F. P., Lourenço, V. A., Sakamoto, I. K., Maintinguer, S. I., Silva, E. L., & Amâncio Varesche, M. B. (2024). Towards a circular bioeconomy to produce methane by co-digestion of coffee and brewery waste using a mixture of anaerobic granular sludge and cattle manure as inoculum. *Chemosphere*, 357.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142062>

Rodríguez Valencia, N., & Franco Zambrano, D. (2010). *Fondo Nacional del Café LOS SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ: FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE.*

Rojas Sossa, J. P. (2015). *EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR MEDIO DE LA BIODIGESTIÓN ANAEROBIA SEMICONTINUA UTILIZANDO RESIDUOS DEL BENEFICIADO DEL CAFÉ COMO SUSTRATO.*

Selvankumar, T., Sudhakar, C., Govindaraju, M., Selvam, K., Aroulmoji, V., Sivakumar, N., & Govarthanan, M. (2017). Process optimization of biogas energy production

CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE CAFÉ

- from cow dung with alkali pre-treated coffee pulp. *3 Biotech*, 7(4).
<https://doi.org/10.1007/s13205-017-0884-5>
- Serna-Jiménez, J. A., Torres-Valenzuela, L. S., Martínez Cortínez, K., & Hernández Sandoval, M. C. (2018). Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Revista ION*, 31(1), 37–42.
<https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018006>
- Søndergaard, M. M., Fotidis, I. A., Kovalovszki, A., & Angelidaki, I. (2015). Anaerobic Co-digestion of Agricultural Byproducts with Manure for Enhanced Biogas Production. *Energy and Fuels*, 29(12), 8088–8094.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02373>
- Sugebo, B. (2022). A review on enhanced biofuel production from coffee by-products using different enhancement techniques. In *Materials for Renewable and Sustainable Energy* (Vol. 11, Number 2, pp. 91–103). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40243-022-00209-0>
- Sun Yonghong, Huang Liping, Xue Lei, & Mu Jun. (2010). *2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. I E E E.
- Tabarquino, R. A., Arango Pastrana, C. A., & Zuluaga Ocampo, I. (2025). La Cadena productiva de café especial en Colombia: un análisis desde el enfoque de redes de política pública. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(5), 8859–8892.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20218

- Tiwari, B. R., Rouissi, T., Brar, S. K., & Surampalli, R. Y. (2021). Critical insights into psychrophilic anaerobic digestion: Novel strategies for improving biogas production. *Waste Management, 131*, 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.002>
- Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2025a). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 210). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>
- Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2025b). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 210). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>
- Wainaina, S., Lukitawesa, Kumar Awasthi, M., & Taherzadeh, M. J. (2019). Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review. In *Bioengineered* (Vol. 10, Number 1, pp. 437–458). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1673937>
- Woldesenbet, A. G., Woldeyes, B., & Chandravanshi, B. S. (2015). *WET COFFEE PROCESSING WASTE MANAGEMENT PRACTICE IN ETHIOPIA*. <http://www.journalajst.com>
- Wu, D., Li, L., Zhao, X., Peng, Y., Yang, P., & Peng, X. (2019). Anaerobic digestion: A review on process monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 103*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.039>

- Wu, D., Li, L., Zhen, F., Liu, H., Xiao, F., Sun, Y., Peng, X., Li, Y., & Wang, X. (2022). Thermodynamics of volatile fatty acid degradation during anaerobic digestion under organic overload stress: The potential to better identify process stability. *Water Research*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118187>
- Xu, R., Zhang, K., Liu, P., Khan, A., Xiong, J., Tian, F., & Li, X. (2018). A critical review on the interaction of substrate nutrient balance and microbial community structure and function in anaerobic co-digestion. In *Bioresource Technology* (Vol. 247, pp. 1119–1127). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.095>
- Yao, Y., Huang, G., An, C., Chen, X., Zhang, P., Xin, X., Jian Shen, & Agnew, J. (2020). Anaerobic digestion of livestock manure in cold regions: Technological advancements and global impacts. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 119). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109494>
- Zhao, C., Mo, J., Qin, Y., Gong, Y., Zhan, O., Song, B., & Wu, W. (2025). Semi-thermophilic anaerobic digestion (41–49°C): A review of its potential for enhanced methane production and system stability. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 215). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115630>