



Universidad
Mariana

Producción de Biogás a partir de pulpa de Café en codigestión con agua residual doméstica

Gabriel Sebastián Delgado Pérez

Nicolás Guerrero Luna

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto Nariño
2024



Universidad
Mariana

Producción de biogás a partir de pulpa de café en codigestión con agua residual doméstica

Gabriel Sebastián Delgado Pérez

Nicolás Guerrero Luna

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor

Mg. Juan Carlos Narváez Burgos

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto Nariño

2024

Contenido

Introducción.....	6
Resumen.....	7
Abstract	8
1.Planteamiento de problema	10
1.1 Justificación.....	12
Formulación	13
Hipótesis.....	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Marco referencial	15
1.4.1 <i>Antecedentes</i>	15
1.4.1.1 Internacionales.....	15
1.4.1.2 Nacional	16
1.4.1.3 Regionales	17
1.4.1 <i>Marco Teórico</i>	17
1.4.2 <i>Marco conceptual</i>	17
1.4.3 <i>Marco contextual</i>	19
1.5 Metodología	22
1.5.1 <i>Paradigma de investigación</i>	22
1.5.2 <i>Enfoque de Investigación</i>	22
1.5.3 <i>Población y muestra</i>	24
1.5.4 <i>Tipo de diseño experimental</i>	25
1.5.5 <i>Técnica e instrumentos de recolección de información</i>	25
1.5.5.1 <i>La técnica de observación</i>	26
1.5.5.2 Instrumentos y materiales de investigación.....	26
2. Resultados y discusión.	28

2.1 Caracterización de la pulpa de café de una finca cafetera en el municipio del Rosario-vereda El suspiro.	28
2.1.1 Determinación de carbohidratos, humedad y cenizas en la pulpa de café.	28
2.2.1 Determinación de conductividad, oxígeno disuelto (OD), pH, solidos volátiles totales (SSD) y temperatura en agua residual	32
2.3 Caracterización de mezclas de agua residual y pulpa de café de una finca cafetera en el municipio del rosario vereda el suspiro	34
2.3.1 Determinación de pH, conductividad y temperatura en mezclas de agua residual y pulpa de café en distintas proporciones	35
2.3.2 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) en mezclas de agua residual y pulpa de café en distintas proporciones	39
2.3.3 Estabilización del sistema de codigestión anaerobia	40
2.4 Análisis de la cantidad y calidad del biogás	45
3. Conclusiones	50
4. Recomendaciones	53
Referencias bibliográficas	54
Anexos	65

Tabla de Anexos

Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 1. Mediciones del peso, humedad, ceniza y carbohidratos de la pulpa de café.....	65
Anexo 2. Mediciones de pH, temperatura, conductividad, OD y SSD del ARD.....	65
Anexo 3. Mediciones de DBO5.....	66
Anexo 4. Mediciones DQO.....	66
Anexo 5. Mediciones de pH en cada una de las mezclas durante 9 semanas.	67
Anexo 6. Mediciones de conductividad en cada una de las mezclas durante 9 semanas.	69
Anexo 7. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado al pH ajustado a su respectivo biorreactor.	71
Anexo 7. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado al pH ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).	72
Anexo 7. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado al pH ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).	72
Anexo 8. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado a la conductividad ajustado a su respectivo biorreactor.....	73
Anexo 8. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado a la conductividad ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).	73
Anexo 8. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado a la conductividad ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).	74
Anexo 9. Mediciones de metano para cada biodigestor.....	74
Anexo 10. Reactores escala laboratorio.....	76
Anexo 11. Presupuesto.....	76

Introducción

El presente trabajo destaca la importancia del aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en el suroccidente de Colombia con el fin de disminuir su impacto ambiental. El café, siendo el segundo producto más comercializado a nivel mundial después del petróleo (Organización Internacional del Café), juega un papel crucial en la economía global. Su producción mundial se estima entre 110 y 120 millones de sacos por año (Welfare and Coffee, 2012). Sin embargo, existe un problema significativo relacionado con la disposición final de la pulpa de café, ya que es un potencial contaminante de aguas, suelos y aire (Londoño, 2017; Rodríguez, 2010).

En Colombia, uno de los principales países productores de café en el mundo, destaca especialmente en el departamento de Nariño, donde las condiciones climáticas y las prácticas culturales autóctonas han posicionado el café nariñense como un café especial (Calpa & Moncayo, 2016; López & Herrera, 2017). Al respecto, la vereda El Suspiro, en el municipio del Rosario, está en proceso de reactivación económica de su producción cafetera, sin embargo, el tratamiento de los desechos ha sido descuidado (FNC, 2019).

El uso de combustibles fósiles es una de las principales causas del cambio climático, generando el 73% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que intensifica el calentamiento global (Molina et al., 2017). Una alternativa es el aprovechamiento de biomasa o residuos orgánicos para producir combustibles con bajas emisiones de GEI, como el biogás, que puede usarse para generar electricidad, calor o reemplazar al gas natural (Espinosa, 2021; González et al., 2017).

En regiones como Latinoamérica, Asia y África, donde cerca de 80 países producen café, Colombia ocupa el cuarto lugar en producción. Sin embargo, la pulpa de café es uno de los residuos menos aprovechados. Aunque el café es fundamental para la economía colombiana, solo se aprovecha entre el 55% y 60% del producto, dejando 784.000 toneladas de biomasa residual por año, principalmente mucílago, pulpa y cascarilla (Jiménez et al., 2018). Estos residuos son potencialmente contaminantes (Novita, 2016; Álvarez et al., 2011).

Muchas regiones rurales de Colombia carecen de los medios para un manejo adecuado de aguas residuales domésticas y sus residuos. La cobertura de sistemas de alcantarillado es inferior al 15%, y el 60% de las aguas residuales domésticas no recibe tratamiento (Botero, 2020). Este manejo inadecuado promueve la diseminación de enfermedades, afectando principalmente a menores de cinco años (Pérez et al., 2016).

En Nariño, donde 31.940 caficultores cultivan café en 28.784 hectáreas, el municipio de El Rosario enfrenta desafíos ambientales debido a la falta de tratamiento de aguas residuales. La comunidad cafetera carece de capacitación sobre el manejo de residuos generados durante la cosecha y procesamiento del café, haciendo de esta actividad una potencial fuente de contaminación (CORPONARIÑO, 2018; Alcaldía Municipal, 2016).

Dadas las condiciones económicas de la zona, es necesario implementar una solución con impacto económico nulo, que genere beneficios a los productores y mitigue el impacto ambiental. Una estrategia prometedora es la producción de biogás mediante sistemas de codigestión, aprovechando la pulpa de café y el agua residual doméstica (Beltrán, 2022). Según el Esquema de Ordenamiento Territorial del Rosario (De El Rosario Nariño, 2012), estas prácticas podrían reducir la contaminación de las fuentes hídricas y la proliferación de enfermedades.

Resumen

La presente investigación evaluó la eficiencia de la producción de biogás mediante la codigestión anaerobia utilizando un sustrato compuesto por pulpa de café y aguas residuales domésticas de una finca cafetera de la vereda El Suspiro, en el municipio del Rosario, Nariño. Se mezclaron muestras de pulpa de café y aguas residuales en diferentes proporciones y se analizaron los parámetros físico-químicos influyentes en el proceso de biodigestión y la producción de metano, además se estabilizó el sistema de codigestión anaerobia en términos de pH. La mayor producción de metano se obtuvo con la proporción 70:30 de pulpa de café y aguas residuales, respectivamente. Además, fue evidente la influencia del pH, el contenido de materia orgánica y la conductividad en el desarrollo de la metanogénesis.

La investigación resalta la importancia de la gestión sostenible de los residuos en la industria del café y la promoción de prácticas responsables en toda la cadena de producción. Se recomienda implementar sistemas de monitoreo y control en las fincas cafetaleras y en las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como promover la concientización y educación sobre la codigestión como una estrategia ambientalmente responsable. Estas conclusiones contribuyen al avance de la sostenibilidad en la industria del café y a la gestión eficiente de los recursos naturales.

Palabras clave: Agua Residual, Co-digestión, Control de Residuos, Eficiencia, Producción de Biogás, Pulpa de Café, Sostenibilidad, Temperatura.

Abstract

The study assessed the performance of biogas production through anaerobic co-digestion using a blend of coffee pulp and domestic wastewater from a coffee farm in “El Suspiro”, Rosario, Nariño. Samples of coffee pulp and wastewater were collected in varying proportions, and the physicochemical parameters influencing the biodigestion process and methane production were analyzed. The anaerobic co-digestion system was stabilized in terms of pH. with the highest methane production achieved with a 70:30 ratio of coffee pulp to wastewater. The impact of pH, organic matter content and conductivity on methanogenesis development was also evident.

The significance of sustainable waste management in the coffee industry and the promotion of responsible practices throughout the production chain are apparent. Recommendations include implementing monitoring and control systems on coffee farms and wastewater treatment plants, as well as promote awareness and education about codigestion as an environmentally responsible strategy. These conclusions contribute to advancing sustainability in the coffee industry and the efficient management of natural resources.

Key words: Wastewater, Co-digestion, Waste Control, Efficiency, Biogas Production, Coffee Pulp, Sustainability, Temperature.

1. Planteamiento de problema

1.1 Descripción del problema

El uso de combustibles fósiles es una de las principales causas del cambio climático, dado que genera el 73 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que acentúan el calentamiento global y alteran el clima (Molina et al., 2017). Al respecto, los combustibles fósiles son responsables del 18 % de la energía para el transporte, 19 % para la construcción, y 43 % de la generación de electricidad. Una alternativa al uso de combustibles fósiles es el aprovechamiento de biomasa o residuos orgánicos residuales como materia prima en la producción de combustibles con bajas emisiones de GEI, como son el biodiesel, bioetanol y el biogás. Último que puede usarse para generar electricidad o calor, y/o reemplazar al gas natural después de ser procesado (Espinosa, 2021; Gonzalez et al., 2017).

En Latinoamérica, Asia y África, cerca de 80 países son productores de café, entre los que Colombia ocupa el cuarto lugar en términos de producción, sin embargo, uno de los residuos orgánicos menos aprovechados en el mundo es la pulpa de café (Hivos et al., 2014). Pese a la importancia del café en la economía colombiana, durante su procesamiento sólo se aprovecha entre el 55 y el 60% del producto, dejando tras de sí 784.000 toneladas de biomasa residual por año, la cual comprende principalmente mucílago, pulpa y cascarilla (Jiménez et al., 2018).

Dicho conglomerado de residuos constituye una potencial amenaza ambiental, dado que circunscriben bioactivos como proteínas y azúcares, que son catalizadores de procesos fermentativos; además de taninos, alcaloides y polifenoles difíciles de degradar biológicamente (Novita, 2016). Uno de los principales afectados son los cuerpos de agua, ya que los microorganismos presentes hacen acopio del oxígeno disuelto para descomponer los residuos, lo que, en última instancia, deriva en la asfixia de la biota acuática (Álvarez et al. 2011). Por otro lado, los ecosistemas terrestres tienden a desarrollar problemas fitosanitarios y de contaminación cruzada, debido a la descomposición no controlada de residuos y sus lixiviados que modifican y deterioran la composición del suelo.

Además de las afectaciones anteriores, muchos de los territorios rurales de Colombia carecen de los medios necesarios para un correcto manejo y tratamiento de las aguas residuales domésticas y sus residuos orgánicos asociados. La cobertura de sistemas de alcantarillado es inferior al 15% y el porcentaje de las aguas residuales domésticas sin tratamiento alguno es del 60%, mientras que, en términos del porcentaje de carga removida, se llega tan solo al 15% (Botero, 2020). Al respecto, el manejo inadecuado de aguas residuales y excretas promueve la diseminación de enfermedades diarreicas agudas, que causan la muerte anual de 2 millones de personas, principalmente en menores de cinco años (Pérez et al, 2016).

Nariño cuenta con 31.940 caficultores que desarrollan su actividad en 28.784 hectáreas en 36 municipios, donde se maneja café arábico de variedad Castilla, Colombia, Caturra, Típica, Borbón y Ta. Este cultivo es fundamental para la vida económica del departamento, dado que genera alrededor de 30 mil empleos (Federación de Cafeteros Nariño, 2021; Comité Departamental de Cafeteros de Nariño, 2008). En la zona cafetera del departamento, está el municipio del Rosario, con 5 corregimientos y 37 veredas, de las cuales ninguna tiene un tratamiento de aguas residuales y, aunque algunas cuentan con alcantarillado, las aguas residuales domésticas son depositadas en zonas donde hay pequeñas fuentes hídricas o en zonas terrestres alejadas del centro poblado (De El Rosario Nariño, 2012). Como en muchas regiones de Colombia, la comunidad cafetera de este municipio carece de la capacitación adecuada sobre manejo de los residuos generados durante la cosecha y procesamiento del café, lo que hace de esta actividad agrícola una fuente potencial de contaminación para el agua, el suelo y la atmósfera (Alcaldía Municipal, 2016; CORPONARIÑO, 2018).

De ahí que buscar una alternativa al manejo actual de la pulpa de café en conjunto con el agua residual doméstica de la región, sea imperativo para el bienestar ambiental, económico y social de este municipio. En ese sentido, la presente disertación busca sentar las bases para el aprovechamiento de dichos residuos orgánicos en un proceso de producción de biogás a escala de laboratorio, ello al establecer la mezcla más útil para un buen rendimiento, teniendo en cuenta sus características y componentes.

1.1 Justificación

Con esta investigación se establecieron los criterios de producción a escala de laboratorio para la generación de biogás en un proceso de codigestión anaerobia, ello aprovechando los residuos sólidos y aguas residuales domésticas asociados a la producción de café en una finca del municipio del Rosario, Nariño. Lo anterior responde a la inexistencia tanto de un plan de gestión integral de residuos sólidos como una planta de tratamiento para el manejo de las aguas residuales domésticas en el municipio. Lo que, incumpliendo el decreto 1713 del 2002 y la normatividad 0631 del 2015 (prestación de servicios públicos de aseo y tratamiento previo al vertimiento de agua residual, respectivamente), no deja otra alternativa a las fincas cafeteras del municipio que deshacerse de sus residuos de café y aguas residuales domésticas en zonas a cielo abierto o en cuerpos de agua cercanos.

A pesar de que la Guía Ambiental para el Subsector Cafetero hace hincapié en prevenir, mitigar y corregir, los impactos ambientales generados por la actividad cafetera, ha hecho caso omiso al tratamiento de residuos orgánicos (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). Las fincas cafeteras amparadas por la Federación Nacional de Cafeteros reutilizan los desechos sólidos como combustible para calderas, ello entre otras estrategias para el manejo adecuado de residuos y lograr reducir los impactos ambientales (Federación Nacional de Cafeteros, 2022). Por el contrario, aquellas fincas sin capacitación de esta ONG son las que generan más residuos orgánicos, como pulpa, mucilago y aguas mieles que, junto con las aguas residuales domésticas, acrecientan su capacidad contaminante. En particular, poseen un gran potencial energético para la generación de metano, un potente gas de efecto invernadero, con una capacidad de calentamiento mundial más de 80 veces mayor que el del dióxido de carbono durante los 20 años posteriores a su liberación a la atmósfera (United Nations Environment Programme, 2021).

Una de las alternativas más prometedoras para disminuir las emisiones de metano es la producción de biogás a partir de residuos, los cuales pueden contar con orígenes distintos, siempre y cuando sean de naturaleza orgánica (Encabo, 2021; Ordoñez, 2021). El biogás como producto de la descomposición de la materia orgánica tiene el potencial de generar la electricidad necesaria para abastecer las necesidades básicas de 138 millones de hogares (UNU-INWEH, 2021, MEM-G, 2015). A nivel doméstico, se estima que en latinoamerica puede contribuir al desarrollo sostenible,

aportando un impacto ambiental positivo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la gestión sostenible de residuos (Cohello & Jaramillo, 2023).

En zonas rurales el biogás favorece a las poblaciones cuya ubicación no cuenta con servicios de gas domiciliario o suministro de gas en bombonas. Al respecto, el proceso de digestión anaerobia se puede aplicar tanto en escala industrial como en asentamientos pequeños de personas, últimos en los que sus propios desechos orgánicos serán la materia prima del proceso (Díaz & Torres, 2019). Inclusive, los residuos asociados al proceso de biodigestión la producción de biogás, como el biosol, pueden aprovecharse como fertilizante de huertas o en las mismas fincas cafeteras, ya que durante su metabolización se eliminan la mayor cantidad de gases contaminantes de cada sustrato (Gómez et al., 2020).

Lo anterior, justifica el desarrollo de un método sustentable, efectivo y que contribuya con el bienestar socio económico de la comunidad de caficultores nariñenses, en aras de mitigar el impacto ambiental de la producción de café y el nulo tratamiento de las aguas residuales domésticas. Dado que ambas problemáticas afectan a una finca cafetera del municipio del Rosario en la Vereda el Suspiro, la presente investigación sentará las bases para implementar de la producción de biogás como solución a estas problemáticas (CORPONARIÑO, 2018).

Formulación

¿Cuál es el rendimiento de la pulpa de café en codigestión con aguas residuales domésticas (ARD) para producir biogás?

Hipótesis

El rendimiento en la producción de biogás mejora significativamente al variar las proporciones de ARD y Pulpa de café.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el rendimiento en la producción de biogás que presenta el proceso de codigestión anaerobia a partir de un sustrato compuesto por pulpa de café y aguas residuales domésticas de una finca cafetera de la Vereda El Suspiro, en el municipio del Rosario.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la composición de diferentes mezclas de sustratos obtenidos en una finca cafetera.
- Estabilizar un sistema de codigestión anaerobia para la cuantificación de potencial bioquímico de metano.
- Analizar la concentración de metano en las mezclas de biogás generado.

1.3 Marco referencial

1.4.1 Antecedentes

1.4.1.1 Internacionales

En México, Veracruz, Ramírez-Martínez et al. (2021) comparte el objetivo general de nuestra investigación, ya que ambas ideas pretenden utilizar subproductos de café para la creación de biogás. Sin embargo, se utilizan otro tipo de tecnologías, tales como biodigestores de alta eficiencia, sistemas de pretratamiento térmico, tecnologías de codigestión, sensores avanzados de monitoreo, sistemas de separación y purificación de biogás, y modelos de simulación computacional, las cuales pueden ser utilizadas como referencia para nuestra investigación.

Por otro lado, el Instituto de nutrición de Centro América y Panamá, Guatemala (1978) señala diferentes factores a tener en cuenta como son los subproductos del café, algunas características de los mismo y el tipo de tratamiento que se les da, ello en su libro Pulpa de café, Composición, tecnología y utilización. Esta información es vital en nuestro tema de estudio ya que tomamos como materia prima a la pulpa de café.

Rivera (2022) cuantifica la producción de biogás a partir de residuos en una finca del distrito de Omia-Amazonas, Perú. Esta investigación es análoga a la nuestra porque también aprovecha la pulpa de café como materia prima. Una de las variables más importantes para la producción de biogás en el estudio de Rivera fue la temperatura, lo cual es congruente con nuestra investigación. Se determina así que, de los 12 biodigestores observados y evaluados durante el proceso de obtención de biogás, el tratamiento 3, compuesto por pulpa de café al 40%, agua miel al 20% y excretas de ganado al 40%, tuvo una mejor eficiencia al momento de generar una mayor cantidad de biogás. Esto se debe a que esta combinación permitió una mejor interacción entre los componentes debido a las características que estos poseen.

Asimismo, se puede constatar que esta investigación tiene un doble beneficio: por un lado, permite reaprovechar los desechos orgánicos que normalmente no se utilizan y son desechados,

generando contaminación en el medio ambiente; y por otro lado, con estos productos se puede generar biogás, el cual puede ser usado en el ámbito doméstico, sustituyendo así la leña u otros productos utilizados para la preparación de alimentos.

1.4.1.2 Nacional

La FNC (2022) ha realizado diferentes estudios para el aprovechamiento de los residuos cafeteros, reducir la crisis energética y la contaminación, algunos de esos estudios se han desarrollado desde 1974 con la publicación del boletín técnico N° 3 para CENICAFÉ Chinchiná (Calle, 1974), en el cual se describe el proceso general y partes de la planta para obtener gas metano a partir de la pulpa de café, además de explicar los beneficios del gas metano, como que no explota fácilmente y tiene un alto poder calorífico. El diseño del digestor establecido en el año de publicación del boletín sirve como referencia para comparar con los modelos actuales. Para nuestro diseño, se tomó como referencia la regulación de la temperatura mediante el agua utilizada en ese diseño.

Al realizar las mezclas de codigestión de pulpa de café y agua residual doméstica (ARD), específicamente aguas negras, Parra (2014- p-20) señala que se debe tener en cuenta características como el tamaño de las partículas del sustrato, para reducir los tiempos de digestión, incrementar el área superficial y mejorar la producción del biogás. Además, hace hincapié en las características de los sustratos, tales como temperatura, pH, Alcalinidad y AGV's.

Dado que no existe un método estándar para la caracterización de la mezcla pulpa de café y agua residual, se decidió tomar parámetros que se apliquen para ambos sustratos. Lo anterior, teniendo en cuenta los parámetros típicos del agua residual mencionadas por Martínez & Pascichaná (2019)

-“Concentraciones típicas de los principales constituyentes del ARD” - y Londoño (2017) – “Caracterización típica del agua residual municipal”. Se incluyó la caracterización aplicada por parte de Londoño (2017), así, los parámetros a analizar son: pH, SST, SS, DBO5, DQO, OD, materia orgánica y porcentaje de humedad y cenizas. Algunos de los parámetros mencionados se van a realizar con la finalidad de complementar el análisis.

1.4.1.3 Regionales

Quinchía-Jaramillo (2022) realizó una revisión exhaustiva de estudios reportados relacionados con las principales variables que impactan la aplicación de la digestión anaerobia. Para lograrlo, se realizó una búsqueda de artículos, para seleccionar los mejores estudios. Se concluyó que la temperatura óptima para la digestión anaerobia está entre 25 y 30°C, el pH debe mantenerse entre 6.8 y 7.2. Además, se determinó que la inoculación es crucial debido a que este tipo de residuos no poseen poblaciones bacterianas metanogénicas; por esta razón, siempre se requiere la incorporación de inóculos para optimizar el proceso.

Estas características y antecedentes apoyaron nuestra investigación al proporcionar un marco teórico sólido y parámetros específicos para el diseño experimental. La comprensión de las condiciones óptimas de temperatura, pH, y la necesidad de inóculos nos permitió ajustar nuestro enfoque experimental para maximizar la producción de biogás a partir de pulpa de café y aguas residuales domésticas en la vereda El Suspiro, municipio del Rosario. La incorporación de estos conocimientos nos ayudó a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de nuestro proceso, asegurando que nuestras prácticas no solo sean efectivas, sino también ecológicamente responsables.

1.4.1 Marco Teórico

1.4.2 Marco conceptual

- **Biogás:** el biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros compuestos que se genera por la degradación microbiana de materiales orgánicos de origen vegetal o animal en ausencia de aire, en un proceso conocido como digestión anaerobia (Sierra H, 2017).
- **Aguas Residuales:** las aguas residuales son aguas procedentes de la utilización de aguas naturales o de red en un uso determinado. Cuando se drenan, se denominan vertidos, y pueden clasificarse según su origen, contenido contaminante y uso prioritario (Wiki, 2007).

- **Metano:** el metano es un hidrocarburo gaseoso saturado, incoloro e inodoro, con propiedades combustibles y capacidad para formar mezclas explosivas con el aire. Es un componente del gas natural y se genera como subproducto de actividades humanas, requiriendo tecnologías específicas para su captura controlada (Solorzano O, 2009).
- **Digestión Anaerobia:** la digestión anaerobia, también conocida como biometanización, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica compleja se descompone gracias a la acción de microorganismos, generando biogás y un residuo estabilizado denominado digerido (Compostaje red española, 2014).
- **Tratamiento:** el tratamiento se refiere a los métodos o medios utilizados para analizar o modificar una sustancia con el fin de comprender su naturaleza o prepararla para su remoción o eliminación, cuando sea necesario (Menéndez C, 2007).
- **Potencial Químico:** el potencial químico se refiere a un sistema formado por una mezcla de dos o más sustancias, en el cual se cumple la ley de Dalton. La variación en la concentración dentro de un sistema tiende a mover partículas desde un potencial químico más alto hacia uno más bajo (González M, 2015).
- **Agroindustriales:** la agroindustria comprende actividades relacionadas con la elaboración, transformación y comercialización de productos agropecuarios. Puede subdividirse en agroindustrias orientadas a productos tradicionales y no tradicionales, especialmente aquellas destinadas a la exportación (Cifuentes X, Jaramillo E & Mejia G, 2016).
- **Sustratos de Café:** los sustratos, como la cascarilla de café, son sustancias o materiales que sustentan la vida de organismos, proporcionando nutrientes, protección y retención de humedad. La cascarilla de café, un subproducto de la industria cafetera se utiliza como abono orgánico y mejora la capacidad de retención de humedad en sustratos (Bolaños Aguilar E, 2012).

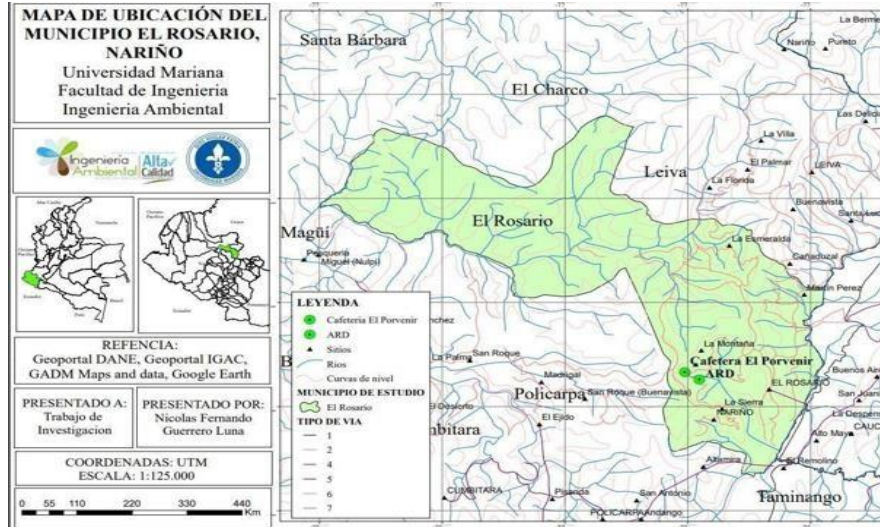
1.4.3 Marco contextual

El Rosario es un municipio colombiano ubicado en el departamento de Nariño, en el sudoeste de la nación. Se sitúa a 61 kilómetros de San Juan de Pasto, la capital del departamento. Fue fundado en 1815 y fue elevado a la categoría de municipio en 1904. La presente investigación se desarrolló en la vereda El Suspiro del municipio El Rosario Nariño a una altitud de 1600 m.s.n.m, longitud de 77° 20' 19''N y una latitud de 01° 44' 48''N, con un área aproximadamente de 566 kilómetros cuadrados que incluyen características como precipitación anual de 200 mm, una temperatura promedio de 18°C y una humedad relativa de 86% (Municipio, 2022). Para el estudio se tomaron puntualmente las zonas de donde se recolectan las muestras de pulpa de café y ARD en la finca, como se muestra en la figura 1.

Dado que una buena proporción de las fincas cafeteras del municipio anteriormente eran fincas de cultivos ilícitos y a que muchos de los agricultores han optado recientemente por el café, los residuos sólidos generados por estas fincas son desechados a cielo abierto mientras que las aguas residuales no son tratadas antes de su previo vertimiento en el suelo. Por ello, con la generación de biogás a partir de estos dos sustratos, dichos residuos serán una fuente de materia de fácil acceso para el desarrollo de la investigación, y en paralelo se reducirá el impacto generado por el deficiente manejo de los residuos en el municipio y la vereda.

Figura 1

Mapa de ubicación de la Finca Cafetera en la Vereda El Suspiro



El estudio busca abordar la caracterización de la composición teórica de distintas mezclas de sustratos obtenidos en una finca cafetera con el fin de explorar la viabilidad de su uso en la codigestión anaerobia para la producción de biogás. Se plantean actividades específicas divididas en tres objetivos principales: caracterización, estabilización del sistema de codigestión y análisis del biogás producido. Las actividades se diseñan para estimar la cantidad de subproductos residuales generados en una finca cafetera, elaborar mezclas de sustratos según un diseño experimental propuesto, y analizar la cantidad del biogás generado.

Tabla 1

Actividades por objetivo de la investigación

Objetivo	Actividad	Resultados
Caracterizar la composición de diferentes mezclas de sustratos obtenidos en una finca cafetera.	Estimar la cantidad de subproductos residuales de beneficio se produce en una finca cafetera	35-45 KG cáscara húmeda-20 L/día
	Integrar diferentes mezclas de sustratos según el diseño experimental propuesto	Repeticiones de Biomasa-ARD (%):50-50, 70-30, 30-70, 20 80, 80-20, 90-10, 10-90 y Testigos: 100-0, 0-100

	Caracterizar los componentes fisicoquímicos de las mezclas de sustratos a evaluar	Parámetros: DBO5, DQO, pH, T°, O2, Cenizas, MO, Humedad, SV,OD
Estabilizar un sistema de codigestión anaerobia para la cuantificación de potencial bioquímico de metano	<p>Construir los sistemas de Biodigestor a escala laboratorio con presión y temperatura constante</p> <p>Alimentar con los sustratos los reactores</p> <p>Estabilización de gasómetros</p> <p>Recolección de datos según variables propuestas</p>	<p>Observación y evaluación del comportamiento de variables clave a lo largo del tiempo durante el proceso de digestión anaerobia.</p> <p>Estudio de las relaciones entre diferentes variables involucradas en la producción de biogás, como la proporción de sustratos, temperatura, pH y cantidad de biogás producido, para identificar patrones y optimizar el proceso.</p>
Analizar la cantidad y calidad del biogás producido	<p>Estabilizar el digestor respecto a las características de los sustratos</p> <p>Realizar la mezcla más útil de los sustratos a escala laboratorio</p> <p>Evaluar la cantidad de biogás generado en los ensayos en laboratorio.</p>	<p>Determinación y preparación de la mezcla de sustratos más eficiente a nivel de laboratorio.</p> <p>Obtención de datos detallados sobre la cantidad de biogás producido en los ensayos de laboratorio.</p> <p>Sugerencias para la</p> <p>aplicación a mayor escala basadas en los resultados obtenidos en laboratorio</p>

El desarrollo de estas actividades permitirá una mejor comprensión de la composición y el potencial bioquímico de las diferentes mezclas de sustratos obtenidos en fincas cafeteras. Además, ofrecerá información importante sobre la viabilidad de la codigestión anaerobia en la producción de biogás, contribuyendo a la identificación de posibles estrategias sostenibles para el manejo de residuos orgánicos en el sector cafetero.

1.5 Metodología

La investigación es de tipo experimental debido a que se obtuvo datos a través de la experimentación para comparar algunas variables relacionadas al tema de estudio y determinar cuáles son las causas o efectos. Además, esta investigación es de carácter ambiental debido a que se busca alternativas para dar solución a problemas ambientales, como lo es, la generación de aguas residuales domésticas y residuos orgánicos, que se generan en una finca cafetera.

El área de estudio es el control de la contaminación, ya que en este caso en una finca de la vereda el Suspiro en el corregimiento del Rosario, en donde se utilizará como materia prima dos residuos generados por esta finca cafetera que son el agua residual y la pulpa de café, para la generación de biogás. La población de nuestro estudio es el agua residual y la cantidad de pulpa de café que se genera en la finca, que es en este caso es de 20 litros de agua residual diarios y 40 kg de pulpa de café resultantes a partir de 100 kg de café, nuestra muestra es de 10 litros de agua residual y 10 kg de pulpa de café.

1.5.1 Paradigma de investigación

La investigación es de tipo positivismo lógico, debido a que las mediciones que se van a realizar durante la investigación son de tipo cuantitativas, con datos sólidos y repetibles. Además, se pretende comprobar la hipótesis planteada mediante estas mediciones y mezclas.

1.5.2 Enfoque de Investigación

La investigación es de tipo experimental debido a que obtenemos datos a través de la experimentación para así lograr comparar algunas variables relacionadas al tema de estudio, para después lograr determinar cuáles son las causas o efectos. Además, esta investigación es de carácter ambiental debido a que se busca alternativas para dar solución a problemas ambientales, como lo es, la generación de aguas residuales domésticas y residuos orgánicos, que se generan en una finca cafetera.

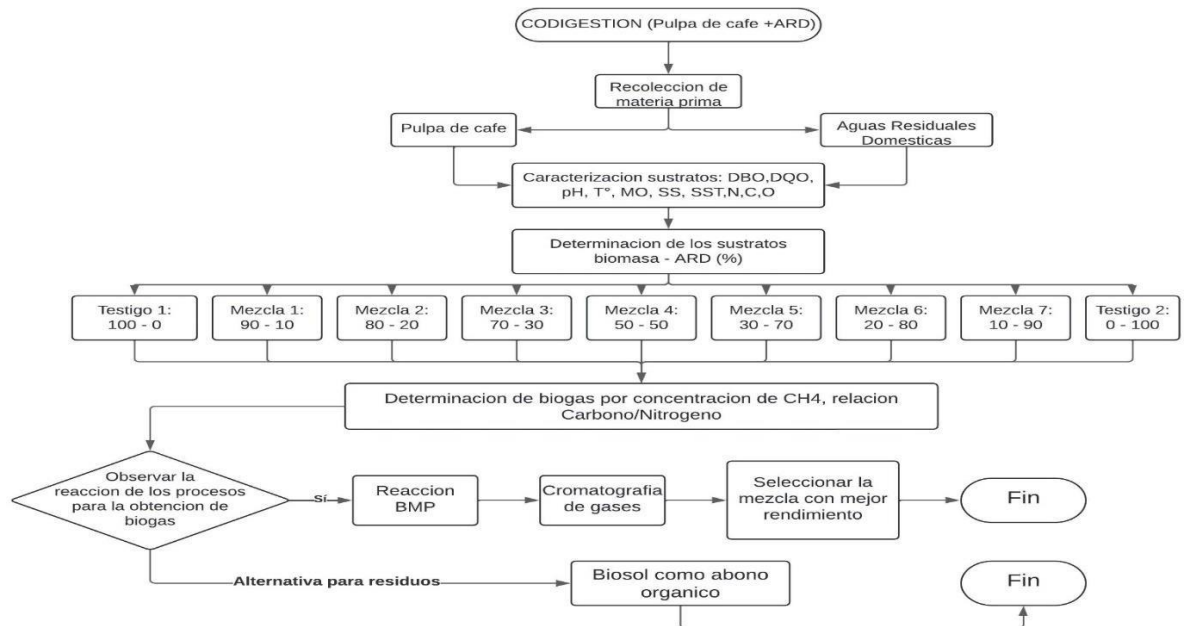
1.5.3 Población y muestra

El desarrollo del estudio implica la combinación de agua residual (ARD) y pulpa de café para obtener un producto deseado. En este proceso, se recolectan 20 litros de agua residual diariamente de la finca cafetera, junto con la pulpa de café que se genera en cada cosecha, calculando aproximadamente 40 kg de pulpa fresca por cada 100 kg de café. Para la investigación, se establece que la muestra a utilizar será de 10 litros de agua residual y 10 kg de pulpa de café.

El diseño experimental incluye la etapa de preparación de la muestra experimental, donde se seleccionan las proporciones específicas de ARD y pulpa de café para cada experimento. Posteriormente, se evaluaron los resultados de estos experimentos y se identificó la mezcla que brinda los mejores resultados. Esta mezcla optimizada se llevará a una escala más grande para obtener una mayor cantidad del producto deseado, todo lo cual se refleja en el diagrama de flujo del estudio.

Figura 2

Diagrama de flujo del diseño experimental



1.5.4 Tipo de diseño experimental

El diseño experimental es de tipo unifactorial. El factor es la mezcla de sustratos y cuenta con nueve niveles: 7 mezclas con distintos porcentajes de pulpa de café y ARD, además de 2 testigos (véase *Tabla 2*). Los factores de confusión que podrían influir en el resultado son la temperatura exterior, la actividad biológica y la composición inusual de las ARD. Cabe mencionar que se debe realizar un análisis estadístico adecuado para evaluar la influencia de los niveles de la mezcla de sustratos en la producción de biogás y para obtener conclusiones precisas sobre el potencial de generación de biogás de las diferentes mezclas de sustratos.

Tabla 2

Tratamientos del diseño experimental

Factor: Mezcla de sustratos			
	1 (Testigo)	100 % ARD	0 % Pulpa de café
	2	90 % ARD	10 % Pulpa de café
	3	80 % ARD	20 % Pulpa de café
	4	70 % ARD	30 % Pulpa de café
Niveles	5	50 % ARD	50 % Pulpa de café
	6	30 % ARD	70 % Pulpa de café
	7	20 % ARD	80 % Pulpa de café
	8	10 % ARD	90 % Pulpa de café
	9 (Testigo)	0 % ARD	100 % Pulpa de café

1.5.5 Técnica e instrumentos de recolección de información

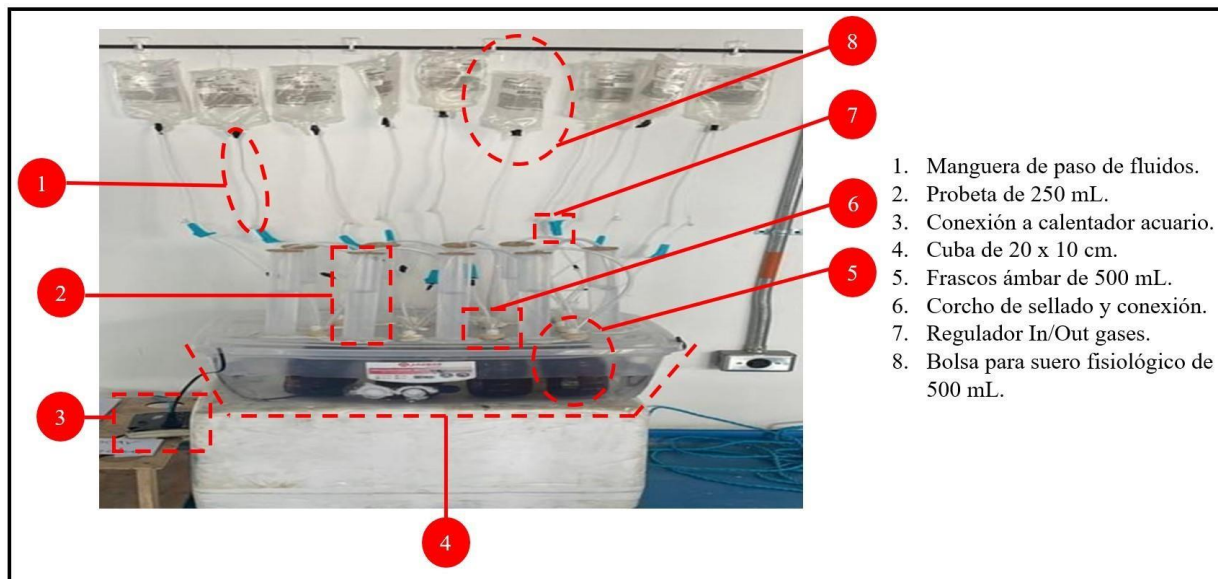
Las técnicas e instrumentos de recolección de información, serían mediante fuentes literarias tanto de la biblioteca de la universidad de Mariana, como también las propias investigaciones que se realizarán en bibliotecas virtuales como, SCIELO, Google Académico, Elibro, entre otras. Se optaron por estas herramientas de investigación ya que nos brinda una gran red de investigación en donde se encuentran diferentes artículos, tesis y trabajos de investigación, semejantes a nuestro tema de investigación, en donde podemos realizar diferentes comparaciones de resultados y analizar al punto en el que llegaron otros investigadores, lo cual nos ayuda a mejorar nuestra propia investigación.

1.5.5.1 La técnica de observación. La técnica de observación que se implementará será en un rango de 10 días, ya que es lo que se tarda en generar determinado volumen de metano (Pérez R, 2000). Ello al determinar el volumen encontrado en la codigestión de diferentes porcentajes de aguas residuales domésticas y pulpa de café, en donde se observa cual genero el mejor rendimiento de biogás.

1.5.5.2 Instrumentos y materiales de investigación. Para el ensamblaje de los 9 biodigestores (Véase Figura 3) se utilizó una cuba de aproximadamente 20 cm de largo y 10 cm de ancho para la manipulación de muestras, 9 frascos ámbar para el almacenamiento de sustancias fotosensibles, 9 mangueras de vidrio que facilitaron el transporte y la manipulación de líquidos, y 9 vasos de precipitados de 250 ml que fueron esenciales para medir volúmenes precisos de líquidos.

Figura 3

Montaje de los 9 biodigestores



Para la determinación de humedad y cenizas se utilizaron 2 vasos de precipitados de 50 ml para mediciones más precisas, 2 cucharas de laboratorio para manipular sólidos y 9 cápsulas cerámicas que se emplearán para contener muestras en condiciones controlada. La mufla se utilizó en procesos de calentamiento y secado de muestras.

Para determinar la conductividad se usó el conductímetro a disposición del laboratorio. El oxígeno disuelto se determinó a través el oxímetro a disposición del laboratorio y un winkler para cada muestra. Para determinar el pH se utilizó el pH-metro a disposición del laboratorio y 1 beaker de 100 mL para cada muestra, al respecto, la temperatura se determinó con el termómetro asociado al pH-metro. Para determinar solidos se utilizaron 2 cápsulas de porcelana, 1 vidrio de reloj, 2 beakers de 250 mL, 2 probetas de 100 mL, 1 probeta de 250 mL, 1 varilla de vidrio, 1 cono Imhoff, 1 pinza para crisol, 1 pinza de sujeción, 1 aro metálico, 1 soporte universal y filtros de fibra de vidrio.

2. Resultados y discusión.

2.1 Caracterización de la pulpa de café de una finca cafetera en el municipio del Rosario-vereda El suspiro.

Tanto la pulpa como el agua residual fueron colectadas el mismo día. Inmediatamente finalizó la extracción de la semilla de café por parte del personal de la finca, se extrajeron 3 muestras de pulpa de café desde el sector de residuos (10 kg/muestra), posteriormente fueron transportadas hasta el laboratorio en una hielera de poliestireno expandido refrigerada con bolsas de hielo. Cada muestra se caracterizó con 5 réplicas por medición.

2.1.1 Determinación de carbohidratos, humedad y cenizas en la pulpa de café.

En aras de iniciar un proceso de escalado para la producción de biogás en un contexto de residuos agropecuarios, es imprescindible definir desde una perspectiva físico-química los sustratos en el sistema de codigestión, dado que harán posible conocer el potencial de producción de producción de metano (Martínez-Amariz & Garrido-Silva, 2019). Los parámetros más relevantes para la pulpa de café son los siguientes:

Tabla 3

Peso, carbohidratos, humedad y cenizas en la pulpa de café

Peso (g)	Carbohidratos (%)	Humedad (%)	Cenizas (%)
2.046 ± 0.039	0.271 ± 0.361	62.605 ± 3.336	36.796 ± 5.73

El porcentaje de carbohidratos cuenta con particularidades notables en el muestreo realizado. Al respecto, desde una perspectiva estadística inferencial, los datos presentan una asimetría positiva, indicando una preponderancia de valores bajos de carbohidratos en la muestra, con la presencia significativa de valores excepcionalmente altos que generan una disparidad entre la media y la mediana (véase Tabla 2). Dicha heterogeneidad sugiere que, entre las propiedades de la pulpa de café, se debería prestar mayor atención a su contenido de grasas y proteínas, dado que el porcentaje de carbohidratos es mínimo y con una alta variación, aunque el contenido de cenizas

es alto. Ello señala que la pulpa de café es un sustrato con un contenido potencialmente alto en lípidos o proteínas y que su codigestión con ARD constituye una alternativa viable para compensar las carencias de cada sustrato para lograr un mejor balance composicional (Díaz et al., 2018). Al respecto, con sustratos en cuya composición química preponderan grasas y proteínas suelen presentarse tasas de hidrólisis bajas e inhibición del proceso de digestión anaeróbica (Galván et al., 2017).

Tabla 4

Resumen estadístico del porcentaje de carbohidratos en la pulpa de café

Media	0,27153
Error estándar de la media	0,093404
Mediana	0,102
Moda	0,074
Desviación estándar	0,361752
Varianza	0,131
Asimetría	1,631
Error estándar de asimetría	0,58
Curtosis	0,822
Error estándar de curtosis	1,121
Rango	0,927
Mínimo	0,053
Máximo	0,98
Suma	4,073

La humedad de la pulpa de café, los valores oscilan entre 57,917 % y el 68,017 %, (véase Tabla 5). Ello es relevante en el contexto de la generación de biogás, ya que puede propiciar un entorno donde microorganismos con una gran capacidad de adaptabilidad, tanto a la humedad como a diferentes condiciones de temperatura, presión atmosférica y disponibilidad de recursos, logren potenciar y proteger el desarrollo de bacterias metanogénicas (Daza et al., 2019).

Tabla 5

Resumen estadístico del porcentaje de humedad en la pulpa de café

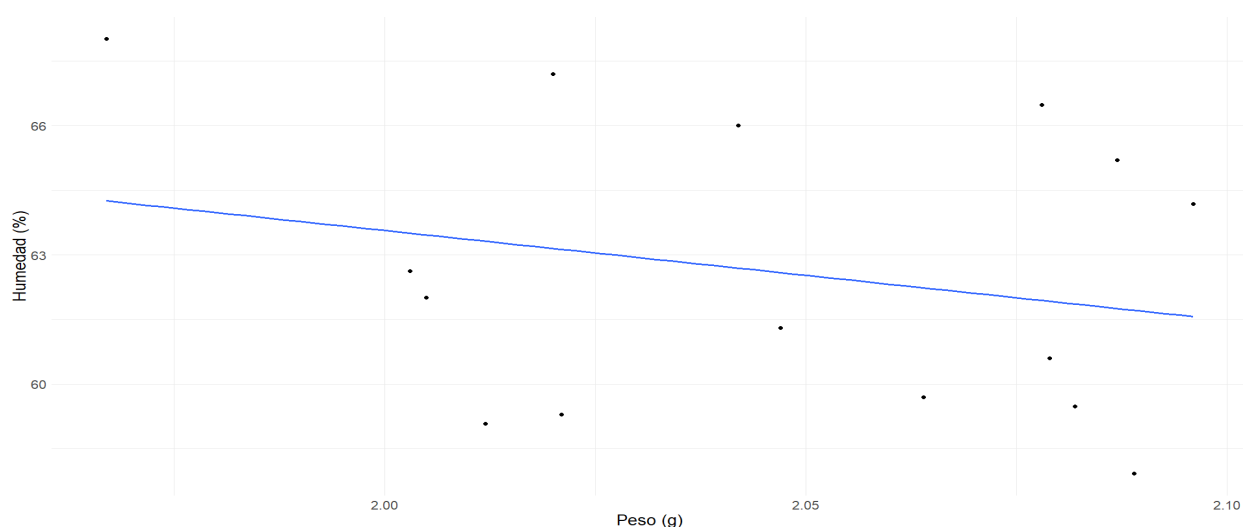
Media	62,605
Error estándar de la media	0,861
Mediana	62,006
Moda	57,917
Desviación estándar	3,336
Varianza	11,129

Asimetría	0,224
Error estándar de asimetría	0,632
Curtosis	-1,571
Error estándar de curtosis	1,265
Rango	10,100
Mínimo	57,917
Máximo	68,017
Suma	939,079

Al respecto, se identificó una correlación negativa entre el peso de la pulpa de café y su contenido de humedad (véase Figura 4). Esto sugiere que dichos parámetros están influenciados por el contenido de cenizas, lo cual es acorde a la caracterización realizada (véase Tabla 3), dado que, mientras el peso de la pulpa de café se acrecienta, el contenido de humedad tiende a bajar y el contenido de cenizas a subir. Un comportamiento acorde a los residuos sólidos de origen vegetal (Vereda & Lahoz, 2006).

Figura 4

Análisis de regresión lineal para el peso y porcentaje de humedad en cada muestra de pulpa de café



Las dos variables, humedad y peso, cuentan con una relación inversa. Es decir, un aumento en una variable resulta en una disminución en la otra. En este caso cuando la pulpa de café contiene cierto contenido de agua como lo es las ARD su peso aumenta. Al respecto, los datos cuentan con

con un grado significativo de dispersión dado que la pulpa de café contó con un porcentaje bajo de humedad y permanecía en el congelador (Penarrieta, 1993)

El contenido de cenizas es un aspecto central en el estudio de la producción de biogás mediante la codigestión de pulpa de café y ARD, dado que es señal de un elevado contenido de macro y micro nutrientes, lo cuales cumplen funciones metabólicas importantes en el metabolismo bacteriano. Al respecto, muchos de los centros catalíticos de las enzimas que intervienen en las rutas metabólicas de producción de metano son dependientes de micronutrientes (Deppenmeier et al., 1996). Entonces, el gran porcentaje de cenizas en la pulpa de café aunado al pequeño porcentaje de carbohidratos, es sinónimo de heterogeneidad en la composición nutricional del sustrato, lo que promueve la diversidad de microorganismos que estimulen el proceso de codigestión (Díaz et al., 2018).

Por otro lado, desde una perspectiva estadística inferencial, la dispersión de los datos es notoria (Véase *Tabla 6*). Ello señala una variabilidad considerable en el contenido de cenizas entre cada una de las muestras, un hecho que se puede atribuir a factores intrínsecos de los equipos de medición y condiciones anómalas en el proceso de manejo de muestras. Sin embargo, la asimetría y curtosis señalan como la distribución de los datos se inclina hacia concentraciones más altas de cenizas en la mayoría de las muestras, lo que respalda la veracidad de los datos registrados.

Tabla 6

Resumen estadístico del porcentaje de cenizas en la pulpa de café

Media	36,797
Error estándar de la media	1,480
Mediana	35,330
Moda	35,330
Desviación estándar	5,730
Varianza	32,838
Asimetría	0,467
Error estándar de asimetría	0,632
Curtosis	-1,002
Error estándar de curtosis	1,265
Rango	19,000
Mínimo	28,330
Máximo	47,330

Suma	551,950
------	---------

2.2 Caracterización del agua residual de una finca cafetera en el municipio del Rosario, vereda El Suspiro.

Tanto el agua residual como la pulpa de café fueron colectadas el mismo día. Inmediatamente finalizó la extracción de la semilla de café por parte del personal de la finca, se extrajeron 3 muestras de agua residual domestica (10 L/muestra) directamente del ducto de vertimiento de la finca, el cual se conecta tanto con la sección agropecuaria como con la domestica. Posteriormente fueron transportadas hasta el laboratorio en una hielera de poliestireno expandido refrigerada con bolsas de hielo. Cada muestra se caracterizó con 5 réplicas por medición.

2.2.1 Determinación de conductividad, oxígeno disuelto (OD), pH, solidos volátiles totales (SSD) y temperatura en agua residual.

Entre los parámetros clave en el contexto del agua residual en procesos de codigestión anaerobia destacan el pH, la temperatura, la conductividad, el oxígeno disuelto y sólidos suspendidos totales. De ahí que hayan sido determinados en la presente caracterización físico-química (Véase Tabla 7).

Tabla 7

Conductividad, OD, pH, temperatura y SSD en agua residual.

Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	OD (mg/L)	pH	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	SSD (mg/L)
3.580 ± 0.192	1.738 ± 0.044	7.542 ± 0.082	21.060 ± 0.502	0.003 ± 0.001

El pH en las muestras indica una ligera alcalinidad, este aspecto puede considerarse un factor que influye positivamente en la producción de metano. Al respecto, en términos de digestión anaerobia, se reporta que pH ácidos (entre 5,5 y 6,0) presentan producciones de metano menores en comparación a pH cercanos a la neutralidad (7.0) (Parra-Orobio et al., 2014), e inclusive se señalan pH alcalinos (8,2 a 8,4) como idóneos para la producción de metano (Acosta & Abreu, 2005). Sin embargo, no se han identificado las especies de bacterias metanogénicas involucradas en dichos procesos.

La desviación estándar sugiere condiciones consistentes en términos de acidez o alcalinidad en las muestras analizadas, lo cual minimiza las interferencias relacionadas con las condiciones ambientales. Por otra parte, el pH in situ del agua residual, considerada agua negra debido a su origen en un inodoro unitario con vertimiento directo al alcantarillado se mantuvo dentro de los valores permisibles (7,49). Se observa una relación directa entre la presencia de orina y heces fecales y el pH, superando el 7, lo que refleja su naturaleza neutra.

Asimismo, la desviación estándar de la temperatura denota condiciones térmicas relativamente constantes durante las mediciones. La conductividad y el oxígeno disuelto muestran fluctuaciones mínimas, lo que indica uniformidad en la medición de estos parámetros. En comparación con la conductividad registrada para sustratos asociados a la industria cafetera (>100 us/cm) (Granda & Martínez, 2020; Acarley 2018; Olano, 2017), la conductividad determinada en esta investigación es muy reducida. Al respecto, aunque la conductividad eléctrica no constituye en sí misma un factor de riesgo a la metanogénesis, a no ser que los iones disueltos sean sustancias tóxicas (Cendales, 2011), sí puede desequilibrar el fenómeno osmótico en las bacterias metanogénicas, ahí su importancia en los sistemas de codigestión anaerobia.

El valor de oxígeno disuelto (OD) medido en el agua fue de 1.738 ± 0.044 mg/L, lo cual indica que los niveles de OD son bajos. Este rango (1.694 mg/L a 1.782 mg/L) está muy por debajo de los valores óptimos necesarios para sostener una vida acuática saludable, que generalmente deben estar por encima de 6 mg/L. El bajo nivel de oxígeno medido en este estudio es consistente con los efectos descritos en la literatura sobre la eutrofización y la presencia de materia fecal en el agua. La descomposición de materia orgánica y el exceso de nutrientes conducen a una disminución significativa de oxígeno disuelto, lo que afecta negativamente la calidad del agua y la vida acuática.

Los sólidos suspendidos totales muestran valores bajos, este valor indica que la cantidad de partículas sólidas suspendidas en el agua es muy reducida, lo cual es generalmente indicativo de una alta calidad del agua.

2.2.2 Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)

EL OD se mantienen relativamente estable (véase Tabla 7), por el contrario, la DBO5 muestra una variabilidad mayor a través de las muestras (Véase Tabla 8). Esta variabilidad en la DBO5 puede tener importantes implicaciones en la calidad del agua y su capacidad para mantener la vida acuática.

Tabla 8

OD, OD5 y DBO5 de agua residual y sus respectivos coeficientes de variación

OD (mg/L)	OD5 (mg/L)	DBO5 (mg/L)
1.736 ±	1.315 ±	126.234 ±
2.36%	2.43%	11.78%

La estabilidad del OD y la variabilidad en la DBO5 señalan la influencia de factores externos en la eficiencia de la producción de biogás, lo que subraya la importancia de mantener un equilibrio adecuado de estos parámetros para garantizar resultados óptimos (Salas, 2024). Frente a estos resultados, la resolución 631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, establece la DBO5 máxima permisible para ARD en 90 mg/L, ello denota la falta de calidad en un sentido doméstico. Por otro lado, en un sentido agroindustrial para el procesamiento de café dicho límite asciende a 400 mg/L. En este caso, donde en un solo ducto de vertimiento convergen agua residual con distintos orígenes, las denominaciones gubernamentales para se tornan ambiguas y generan riesgo para la población rural.

2.3 Caracterización de mezclas de agua residual y pulpa de café de una finca cafetera en el municipio del rosario vereda el suspiro.

Para este propósito se hará mención a cada uno de las mezclas en los biodigestores con una nomenclatura particular (véase Tabla 9), ello con el objetivo de facilitar el desarrollo del análisis.

Tabla 9

Nomenclatura para cada mezcla de los biodigestores

Bidigestor	Mezcla	
100ARD	0 % Pulpa de café	100 % ARD
100P	100 % Pulpa de café	0 % ARD
10P90ARD	10 % Pulpa de café	90 % ARD
20P80ARD	20 % Pulpa de café	80 % ARD
30P70ARD	30 % Pulpa de café	70 % ARD
50P50ARD	50 % Pulpa de café	50 % ARD
70P30ARD	70 % Pulpa de café	30 % ARD
80P20ARD	80 % Pulpa de café	20 % ARD
90P10ARD	90 % Pulpa de café	10 % ARD

2.3.1 Determinación de pH, conductividad y temperatura en mezclas de agua residual y pulpa de café en distintas proporciones.

El espectro físico-químico, particularmente pH y conductividad, se modifica según las proporciones sustratos cambian (*Véase Figura 5*). Se observa que conforme aumenta la proporción de pulpa de café en las muestras, el pH tiende a disminuir ligeramente. Esta disminución indica una tendencia hacia condiciones más ácidas en la mezcla, lo que impacta la eficiencia del proceso de producción de biogás. Ello señala que la microbiota involucrada en este proceso está compuesta por microorganismos hidrogenantes y acidogénicos, dado que prefieren valores dentro del rango de 5.5 y 6.5. Además, es acorde al rango óptimo para las bacterias metanogénicas entre 6.8 a 7.2 (Matamoros, 2016; Quinchía-Jaramillo et al., 2019).

La temperatura permanece relativamente constante en todas las proporciones de muestra (entre 24 y 25°C). Ello denota un control estable de la temperatura durante la digestión anaerobia, factor crucial ya que variaciones significativas podrían afectar la actividad microbiana, ya que pequeños cambios en temperatura de incluso 2°C pueden reducir la velocidad de producción de biogás (Ward et al. 2008). Al respecto, la temperatura en la cual se desarrolló el proceso de codigestión asegura que las bacterias metanogénicas digieran la materia orgánica con eficiencia, dado que Romero et al. (2013) la definieron en un rango de temperatura entre 20°C y 34.2°C.

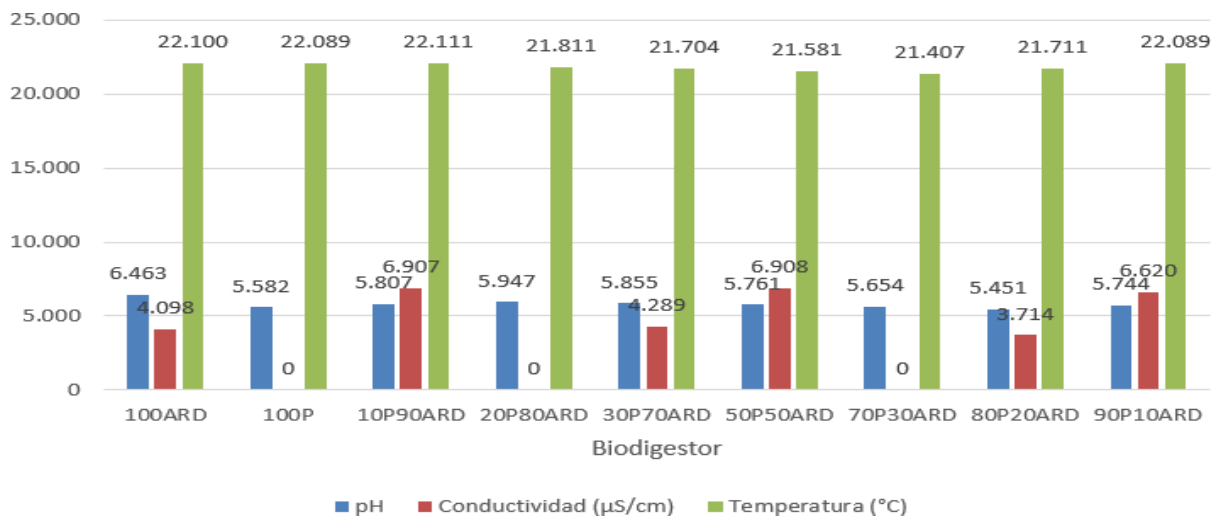
En contraparte, la codigestión anaerobia termofílica (55-70°C) tiene una ventaja sobre la digestión mesofílica (37°C) resultando en una velocidad de reacción más rápida y mayor productividad comparada con la digestión anaerobia mesofílica. Las condiciones óptimas para

digestión anaerobia podrían ser una hidrólisis/acidogénesis termofílica seguida de una metanogénesis mesofílica (Mao et al., 2015). Sin embargo, dado que la temperatura de operación en este estudio se mantiene en el rango mesofílico, se sugiere que las bacterias involucradas en este proceso tienden a ser mesofílicas, aunque podrían contar con actividades metanogénicas menores. Bacterias psicrófilas, que operan por debajo de los 20°C, no serían óptimas en este contexto dado el rango de temperatura utilizado.

La conductividad fluctúa en las diferentes proporciones de muestra, lo que refleja la heterogeneidad en la concentración de iones de las diferentes proporciones de mezclas (Véase Figura 5).

Figura 5

Histograma de pH, conductividad y temperatura para cada mezcla de agua residual y pulpa de café



La caracterización de los sustratos, tanto de forma individual como en mezclas, es fundamental para comprender las condiciones óptimas que favorecen el desarrollo de las poblaciones bacterianas responsables de la producción de biogás con las condiciones particulares de esta investigación. Al respecto, dado que la presente investigación no aplica técnicas microbiológicas de cultivo o de secuenciación de material genético para identificar los taxa presentes en las comunidades microbianas responsables de la digestión anaeróbica, los resultados registrados solo constituyen un esbozo para sacar el máximo provecho a los microorganismos presentes en los

sustratos dentro de cada biodigestor. Es decir, por desconocimiento de cuales microorganismos habitan la pulpa de café y el ARD, muchos de los potenciales productores de metano pueden verse inhibidos por carecer de las condiciones idóneas para su desarrollo. Entonces, los resultados de esta investigación solo señalan las condiciones adecuadas para aquellos microorganismos que sobrevivieron a las condiciones impuestas en cada biodigestor. De ahí que, si en futuras investigaciones se caracterizan microbiológicamente los sustratos, será posible modular los parámetros físico químicos en función del desarrollo de los grupos microbianos con el mejor prospecto metabólico en términos de producción de metano (Cendales, 2011). Particularmente se conocen 13 géneros de bacterias metanogénicas, cada uno con distintas especies que necesitan condiciones de crecimiento específicas (Garnica & Rivera, 2022).

Por lo anterior es relevante establecer si existen diferencias significativas entre los parámetros físico químicos de una mezcla y otra. Al respecto, dadas las características del muestreo es posible aplicar una prueba ANOVA, donde los parámetros pH y conductividad exhiben diferencias significativas, mientras que la temperatura no lo hace (*Véase Tabla 10*).

Tabla 10

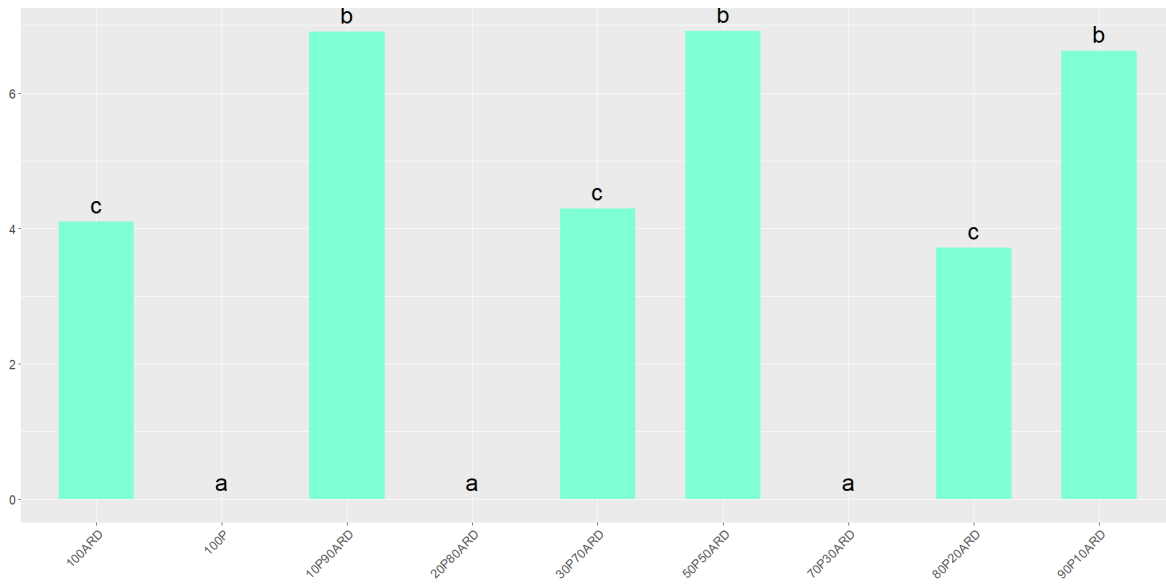
Resumen ANOVA para conductividad, Temperatura y pH en cada mezcla

	Df	Sum_Sq	Mean_Sq	F_value	Pr_F
Conductividad	8	635,4	79,43	299,7	2E-16
	72	19,1	0,27		
Temperatura	8	5	0,6248	1,214	0,303
	72	37,07	0,5148		
pH	8	5,924	0,7405	2,09	0,0478
	72	25,509	0,3543		

Dadas las diferencias significativas tanto en el pH como conductividad para cada tratamiento, es pertinente identificar en cuales tratamientos difieren particularmente, siendo de particular interés la conductividad dado su alto grado de significancia, en contraste el pH cuenta con un escaso nivel de significancia. Ello a través de una prueba post hoc, en este caso Tukey HSD (*Véase figura 6 y 7*).

Figura 6.

Comparaciones basadas en una prueba de Tukey entre la conductividad de cada mezcla



El alto grado de significancia en las diferencias de conductividad entre las 9 mezclas se ve reflejado en la Figura 6, al respecto, se forman 3 grupos. El primero consta de 100ARD, 30P70ARD y 80P20ARD, mezclas cuya conductividad es 4.03 en promedio; el segundo consta de 10P90ARD, 50P50ARD y 90P10ARD, mezclas cuya conductividad es 6.811 en promedio; mientras que, el tercer grupo, consta de 100P, 20P80ARD y 70P30ARD, mezclas cuya conductividad es 0.001 en promedio.

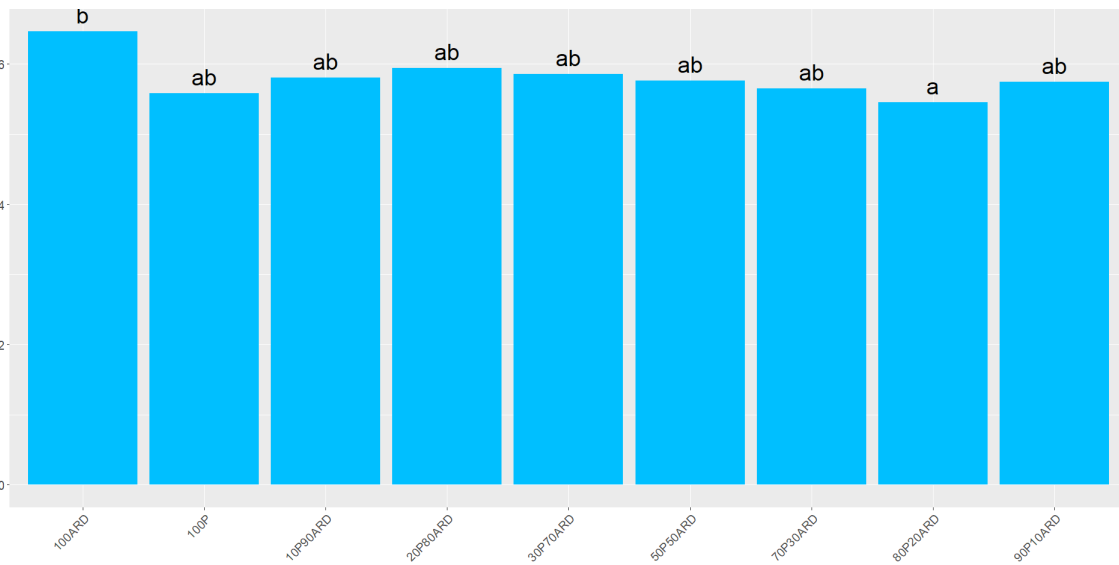
La conductividad eléctrica corresponde a una variable fisicoquímica relacionada con la capacidad que tienen las soluciones para transportar y permitir el flujo de electrones generando corriente eléctrica, donde entre más electrolíticas sean las soluciones existirá más potencial de conducción. Entonces, tal propiedad depende de la concentración y movilidad de electrolitos, como minerales (cationes), sales (aniones), ácidos y bases disociadas, las cuales producen flujos de electrones en solución acuosa (Granados-Moreno et al. 2022).

Con base en lo anterior, se esperaría que los tres grupos diferenciados en cuanto a conductividad se reflejaran respecto al pH. Sin embargo, frente al pH, 7 de las mezclas no presentan diferencias significativas, mientras que 100ARD y 80P20ARD, cuentan con valores superiores e inferiores, respectivamente (Véase Figura 7). Entonces, aunque en el pH las mezclas no formaron grupos tan claramente diferenciados como en la conductividad, si se logra observar que mezclas con un pH

ligeramente alcalino cuentan con una conductividad mucho mayor que aquellas mezclas con un pH ligeramente ácido. Este resultado, a pesar de ser aun un esbozo de la relación del pH con la conductividad en este tipo de matrices (mezclas pulpa de café y agua residual) es relevante, dado que contrasta con caracterizaciones de otras matrices, en particular con suelos, dado que ahí se habla de una relación negativa entre conductividad y pH (Ramirez et al., 2022).

Figura 7

Comparaciones basadas en una prueba de Tukey entre el pH de cada mezcla



2.3.2 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) en mezclas de agua residual y pulpa de café en distintas proporciones.

Esta determinación es esencial para el estudio de la producción de biogás a partir de la pulpa de café en codigestión con aguas residuales domésticas, ya que revela la cantidad de materia orgánica presente en las muestras y su capacidad para descomponerse durante el proceso de digestión anaerobia (Véase Tabla 11).

Tabla 11

DQO para cada mezcla

Biodigestor	DQO (mg/L)
100ARD	320 ± 128
100P	368 ± 144
10P90ARD	208 ± 112
20P80ARD	208 ± 112

30P70ARD	240 ± 16
50P50ARD	208 ± 16
70P30ARD	240 ± 48
80P20ARD	192 ± 128
90P10ARD	224 ± 32

2.3.3 Estabilización del sistema de codigestión anaerobia

Con el objetivo de estabilizar el sistema de co-digestión anaerobia se llevaron a cabo mediciones de pH y conductividad durante 9 semanas. Los principales parámetros utilizados en la evaluación de un proceso de digestión anaeróbica son los siguientes: Volumen y composición de gases producidos, temperatura, pH, ácidos volátiles, alcalinidad, potencial de oxi-reducción, relación DBO/DQO, sólidos totales y volátiles, relación C/N/P, amoníaco, sulfatos/sulfitos, metales pesados, alcalinos y alcalinotérreos (Acosta & Abreu, 2005).

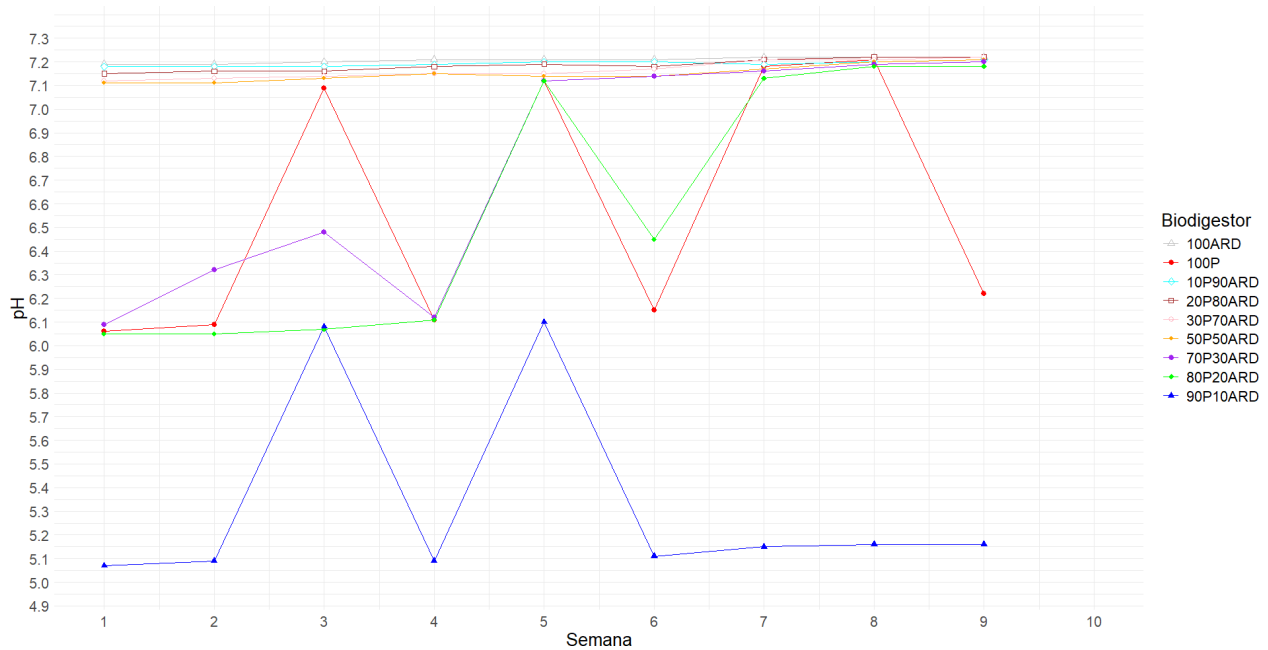
Sin embargo, para este objetivo solo se determinaron el pH y conductividad dado que, aunque se destinó un orificio en la sección superior de cada biodigestor para la inserción de electrodos, en el acervo de equipos del laboratorio solo se disponía de electrodos de pH y conductividad con la capacidad operar en mezclas semisólidas, mientras que, para los demás parámetros se requería la extracción de muestras en soluciones acuosas. Así, en aras de cumplir con la cuantificación del metano producido, fue imposible retirar muestras de mezcla de los biodigestores, ya que ello significaría la pérdida de todo el metano producido. Este enfoque buscó identificar cómo el pH y conductividad se comportan a través del tiempo en función de la producción de metano de cada biodigestor, dada la relevancia de estos parámetros en el proceso (Bernal-Martinez, 2020). Por lo tanto, durante 9 semanas de codigestión, se determinó la tendencia de comportamiento de pH y conductividad (*Véase Figura 8 y Figura 9, respectivamente*).

Respecto al pH, se puede observar que todos los biodigestores tienden a alcalinizarse según transcurre el tiempo, sin embargo, para cada biodigestor existen pendientes (cambio de pH/semana) y valores iniciales diferentes. Para evaluar esas particularidades se generaron modelos de regresión lineal ajustados para cada biodigestor (*Véase Tabla 12*). Los biodigestores 90P10ARD y 100P se excluirán del análisis ya que el pH registrado no se ajusta a sus respectivos modelos, posiblemente por inconsistencias asociadas al proceso de medición. En contraparte, los 7 biodigestores restantes cuentan con modelos estadísticamente significativos. Entre ellos es

evidente que todos los biodigestores con más de un 50% de ARD y menos de un 50% de pulpa cuentan con un pH inicial superior a 7, mientras que todos los biodigestores con más del 50% de pulpa y menos de 50% de ARD cuentan con un pH inferior a 6. Así, se forman dos grupos de biodigestores, uno que inicia con un pH relativamente neutro y otro que inicia con un pH ligeramente ácido (véase Tabla 10). En el grupo de biodigestores con un pH inicial relativamente neutro se evidencia un aumento en el pH de aproximadamente 0.008 por semana, mientras que en los biodigestores con un pH inicial ligeramente ácido (80P20ARD y 70P30ARD) se evidencia un aumento en el pH de aproximadamente 0.164 por semana. Ello denota que los biodigestores 80P20ARD y 70P30ARD tienen una capacidad alcalinizante mayor.

Figura 8.

Comportamiento del pH en función de la mezcla y las semanas.



Para el control y evaluación del rendimiento del proceso de digestión el pH es uno de los parámetros más importantes, ya que pH ácidos no favorecen el proceso de metanogénesis. Si esto sucede se debe alcalinizar el medio con un sustrato o agente alcalinizante, además, para que el inóculo se aclimate antes del arranque de los reactores anaeróbicos el pH debe oscilar entre 6.6 y 7.5 (Soto et al., 2021), lo cual se logró en la presente investigación, dado 7 de los 9 biodigestores lograron estabilizarse a ese rango, incluyendo aquellos que iniciaron con un pH menor al

recomendado (Véase Tabla 12 y Figura 8); ello a excepción de 100P y 90P10ARD, cuyos modelos no son significativos.

Tabla 12

Parámetros relevantes en los modelos de regresión lineal ajustados al pH de cada biodigestor

Biodigestor	pH Inicial	Pendiente (Cambio de pH/semana)	Significancia del modelo (p-valor)	pH Final
100 ARD	7.186	0.004 ± 0.000	9.1e-05	7,22
100 P	6.229	0.070 ± 0.069	0.348	6,22
90P10ARD	5.440	-0.021 ± 0.058	0.729	5,16
80P20ARD	5.729	0.172 ± 0.037	0.002	7,18
70P30ARD	5.971	0.157 ± 0.033	0.002	7,2
50P50ARD	7.089	0.012 ± 0.001	0.0001	7,21
30P70ARD	7.100	0.013 ± 0.001	2.02e-05	7,22
20P80ARD	7.138	0.009 ± 0.000	2.77e-05	7,22
10P90ARD	7.174	0.003 ± 0.000	0.001	7,21

Los efectos del pH se reflejan en la actividad enzimática de los microorganismos. Las formas generales en que el pH influye en la actividad microbiana son dos: Cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminos) y alteración de los compuestos no enzimáticos del sistema (ionización del sustrato y desnaturalización de la estructura proteica de la enzima) (Acosta & Abreu, 2005). De ahí que, en el desarrollo del proceso de estabilización, se haya buscado identificar como la proporción de los sustratos, tanto pulpa de café como ARD, influyen en el cambio del pH.

Para regular el pH en un proceso anaerobio se pueden emplear diferentes métodos. Por un lado, están aquellos para asegurar una capacidad buffer del sistema, donde se adicionan bases (fundamentalmente cal o sosa); se adicionan ácidos (orgánicos o inorgánicos); se adiciona agua residual al biodigestor o se disminuye de la carga orgánica aplicada al proceso. Los dos últimos métodos son relevantes en la estabilización del sistema de codigestión anaerobia desarrollado en la presente investigación, dado que el ARD es un potencial agente alcalinizante que contrarresta la producción excesiva de ácidos orgánicos volátiles (AGV) ocasionada por cantidades elevadas de materia orgánica (pulpa de café en nuestro caso) (Acosta & Abreu, 2005). Ello explicaría la relación directa entre la acidez y proporciones elevadas de pulpa de café (biodigestores 90P10ARD, 80P20ARD y 70P30ARD), mientras que elevadas proporciones de ARD cuentan con

una relación directa con la alcalinidad (biodigestores 50P50ARD, 30P70ARD, 20P80ARD, 10P90ARD, 100 ARD) (Véase Tabla 12). Además, se corroboró que aguas residuales con residuos orgánicos complejos, como los ganaderos o los municipales, debido a su alta alcalinidad, permiten una autorregulación permanente del pH (García-Mancha, 2016). Al respecto, es evidente la gran capacidad buffer del ARD, dada la relación inversa entre proporciones elevadas de ARD y la magnitud del cambio en el pH, lo cual también se refleja en el pH final casi idéntico de los biodigestores con proporciones elevadas de ARD (Véase Tabla 12).

Respecto a la conductividad, se puede observar que en todos los biodigestores la conductividad tiende a permanecer constante durante las 9 semanas. Para evaluar esas particularidades se generaron modelos de regresión lineal ajustados para cada biodigestor (Véase Tabla 13). Los biodigestores 100P y 90P10ARD se excluirán del análisis ya que la conductividad registrada no se ajusta a sus respectivos modelos, posiblemente por inconsistencias asociadas al proceso de medición. En contraparte, los 7 biodigestores restantes cuentan con modelos estadísticamente significativos. En la semana 1, los biodigestores con más de un 50% de ARD y menos de un 50% de pulpa contaron con una conductividad entre 6.3 y 6.7 us/cm, mientras que los biodigestores con menos del 50% de ARD y más de un 50% de pulpa contaron con una conductividad de 4.1 us/cm en promedio. Dichos valores permanecieron relativamente constantes, como lo muestran los valores exigüos en las pendientes (cambio de conductividad/semana). Así, se forman dos grupos de biodigestores, uno cuya conductividad es relativamente baja y otro cuya conductividad es mayor (véase Tabla 13 y Figura 9). Entonces, dado que la conductividad es un indicador del contenido de iones, es factible que proporciones elevadas de ARD se vean reflejadas en el contenido de iones en la mezcla. Lo que, en última instancia, representa mayor estrés osmótico para las bacterias metanogénicas responsables de la producción de biogás con derivados del café (Acarley & Quipuzco, 2020).

Figura 9

Comportamiento de la conductividad en función de la mezcla y las semanas

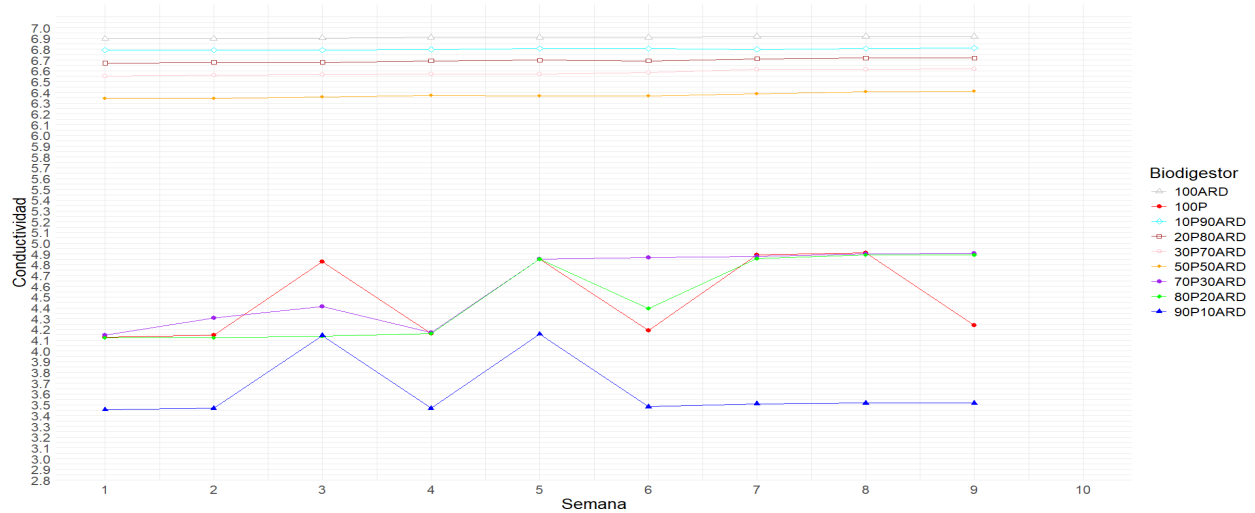


Tabla 13

Parámetros relevantes en los modelos de regresión lineal ajustados a la conductividad en cada biodigestor

Biodigestor	Conductividad Inicial	Pendiente (Cambio de conductividad/semana)	Significancia del modelo (p-valor)	Conductividad Final
100 ARD	6.899	0.0027667 ± 0.0476900	$8.034e-05$	6.919
100 P	4.129	0.0479000 ± 0.0003391	0.349	4.238
90P10ARD	3.454	-0.014370 ± 0.0400400	0,730	3.516
80P20ARD	4.122	0.1178000 ± 0.0253000	0,002	4.892
70P30ARD	4.149	0.1071300 ± 0.0225600	0,002	4.906
50P50ARD	6.344	0.0084170 ± 0.0011290	0.0001	6.412
30P70ARD	6.551	0.0090167 ± 0.0008713	$1.707e-05$	6.619
20P80ARD	6.672	0.0063167 ± 0.0006619	$2.908e-05$	6.719
10P90ARD	6.792	0.0023833 ± 0.0004962	0.001	6.812

2.4 Análisis de la cantidad y calidad del biogás.

Al finalizar el periodo de biodigestión (9 semanas) las bolsas conectadas a cada biodigestor, en las cuales se había almacenado el biogás, fueron retiradas. Estas bolsas se conectaron a la sección inferior de un recipiente hermético, y en la sección superior se instaló el sensor de un medidor de metano (GiiHoo SPD203). Posteriormente se determinó la concentración de metano en cada bolsa por triplicado.

Los resultados demostraron que las mezclas con porcentajes elevados de pulpa de café presentaron un incremento en la producción de biogás. Se observó un incremento lineal en la producción de biogás al aumentar la proporción de pulpa de café en la mezcla, alcanzando su punto máximo alrededor del 70%. En contraste, las mezclas con porcentajes más altos de ARD exhibieron una producción de biogás menor (*Véase Tabla 14*).

Tabla 14

Metano producido por cada mezcla

Mezcla	Metano (PPM)
100ARD	5.500 ± 1.870
100P	26.166 ± 1.940
10P90ARD	11.333 ± 2.065
20P80ARD	20.000 ± 2.000
30P70ARD	29.833 ± 2.483
50P50ARD	35.500 ± 1.870
70P30ARD	80.000 ± 1.414
80P20ARD	43.333 ± 2.804
90P10ARD	57.833 ± 1.471

Las afirmaciones anteriores se corroboraron con una prueba ANOVA, cuyos resultados indican que efectivamente existen diferencias significativas entre los tratamientos (*Véase Tabla 15*).

Tabla 15

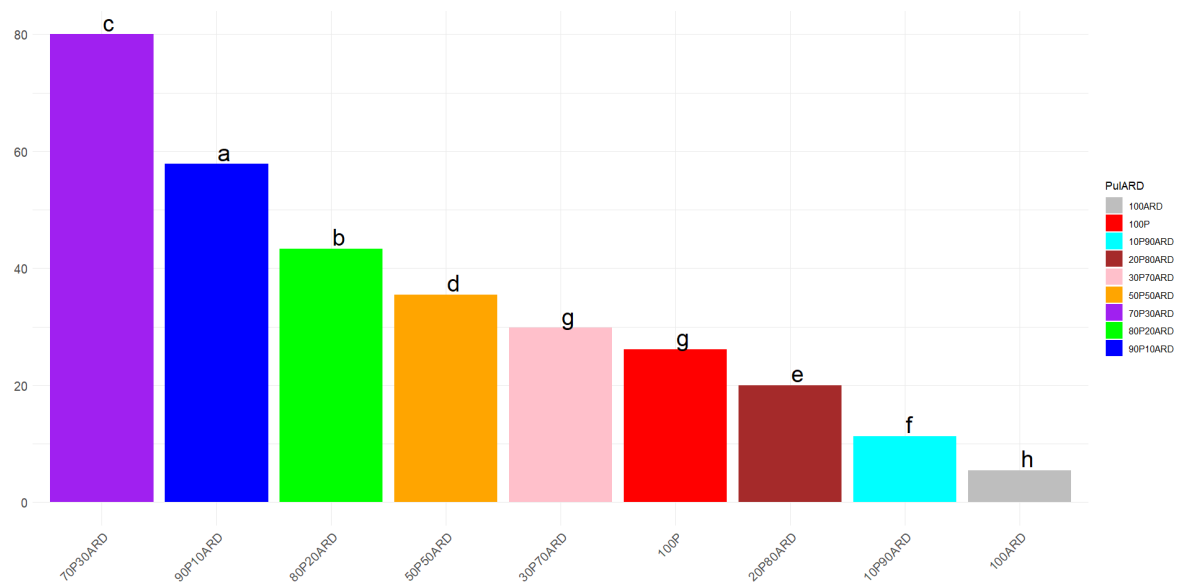
Prueba ANOVA para la producción de metano en cada mezcla

Df	Sum_Sq	Mean_Sq	F_value	Pr_gt_F
8	26237	3280	792,7	<2e-16
45	186	4		

Dadas las diferencias significativas en la producción de metano para los nueve tratamientos, se torna imprescindible identificar en cuales tratamientos difieren particularmente. Ello a través de una prueba post hoc, en este caso Tukey HSD (Véase figura 10). Al respecto, las concentraciones puras tanto de ARD como de pulpa cuentan con las concentraciones más bajas de metano. Sin embargo, parece haber una relación donde al elevar la concentración de pulpa residual y disminuir la cantidad de ARD, habrá una mayor producción de metano. Siendo el tope máximo de pulpa de café un 70% y el tope mínimo de ARD un 30%, ya que en caso de excederlo o disminuirlo, respectivamente, la producción de metano disminuye.

Figura 10

Comparaciones basadas en una prueba de Tukey entre la producción de metano de cada mezcla



En términos de calidad, aunque las concentraciones registradas son un buen prospecto a escala de laboratorio, cabe una gran posibilidad de que la producción de metano fuese mayor si la estructura del biodigestor hubiese contado con un sistema de agitación. Al respecto, es muy probable que la usencia de una homogeneización continua, haya disminuido el tiempo de contacto de las bacterias con los sustratos orgánicos e inorgánicos necesarios para su desarrollo. Lo cual deriva en la acumulación de sustratos metabólicamente relevantes en el fondo del biodigestor,

además de una escasa ruptura de sólidos volátiles y, por ende, una menor producción de biogás (Pérez & Quinchía, 2019).

En el mismo sentido, haber omitido el proceso de inoculación microbiana en el sistema de codigestión es un factor que probablemente redujo el rendimiento de producción de metano. Existe la noción de que la pulpa de café es un sustrato pobre en términos de carga y diversidad de bacterias metanogénicas, de ahí que se considere necesario optar por un agente inoculante (Pérez & Quinchía, 2019; García, 2014). Dicha necesidad no pudo ser suplida en el área de la cual provienen los sustratos usados en esta disertación, dada la ausencia de actividad ganadera en la zona. Al respecto, el estiércol de ganado vacuno es uno de los inóculos más eficientes (Del Real Olvera & Gutiérrez, 2010). Inclusive, se han registrado evidencias de una correlación fuerte y positiva entre la concentración del inóculo y la cantidad de biogás generado a partir de pulpa de café (Rosa, 2015).

Al respecto, el experimento que soporta a la presente disertación se desarrolló en el marco de bioprocesos a escala de laboratorio, de ahí que los resultados de producción de metano fueran expresados en términos de concentración y no en términos volumétricos. Es decir, se determinó cual mezcla de sustratos genera el biogás con mayor concentración de metano, pero no se identificó cual mezcla produce el mayor volumen de biogás. Lo anterior subyace en que, contrario a lo que ocurre con investigaciones a gran escala (Londoño, 2017; Balseca & Cabrera, 2011), esta investigación pretende sentar las bases para un proceso de escalado, no pretende desarrollarlo en sí mismo.

Frente a lo anterior, la codigestión de materias ricas en carbono promueve el crecimiento bacteriano (Soto et al. 2021), ello señala que, a priori, habría un aumento exponencial en la producción de metano según el porcentaje de pulpa de café aumentaba del 30% al 90%. Sin embargo, el biodigestor con mayor producción de metano no se encuentra en dicho rango, dado que elevadas proporciones de pulpa de café pueden llegar a inhibir el crecimiento de microorganismos potencialmente beneficiosos para el proceso de biodigestión (David et al., 2018). Es por ello que la proporción del 70% de pulpa de café y el 30% de ARD es ideal, ya que se estaría utilizando una materia rica en carbono junto con desechos abundantes en nitrógeno para contrarrestar la inhibición de la comunidad de microorganismos (Zhang et al., 2019).

En el mismo sentido, los ácidos grasos volátiles (AGV), a pesar de ser precursores de la metanogénesis, cuentan con algunas especies químicas que pueden inhibir el proceso. La inhibición del proceso de codigestión depende en gran medida del tipo de AGV presente, dado que mientras más pequeña es la cadena estructural del ácido, más pequeña es la concentración de éste que puede inhibir el proceso. Entonces, como una cantidad excesiva de AGV en el sistema puede ser provocada por la presencia de una carga orgánica muy elevada, esta es otra razón por la cual el umbral de pulpa de café se estableció en el 70% para la mayor producción de metano (García-Mancha, 2016; Acosta & Abreu, 2005).

Por otro lado, aunque la conductividad no representó una influencia directa en el proceso de codigestión anaerobia, si conto con una influencia considerable en la actividad metanogénica de las bacterias. Ya que un aumento en la cantidad de ARD se refleja en la cantidad de iones, los cuales modulan el fenómeno de presión osmótica en las células. Así, en el marco de homeostasis celular, las bacterias tienden a igualar las concentraciones iónicas entre el citoplasma y el medio, ello a través de la expulsión de agua hacia el medio. Entonces, cuantos más iones haya en el medio, más agua expulsarán las bacterias, lo que provoca su deshidratación y por tanto su muerte (Ortiz, 2011). Dicho comportamiento es evidente en el descenso abrupto de la producción de metano en cuanto la proporción de ARD supera el 50% (*Véase Figura 6*).

Otra de las condiciones que limitaron a los tratamientos 100ARD, 10P90AR, 20P80ARD y 100P es que básicamente representan monodigestiones de ARD en los tres primeros casos y de pulpa de café en el cuarto. Esto ha sido reportado como un problema asociado la inestabilidad del proceso de digestión anaeróbica, dado que la utilización de desechos de una misma naturaleza puede provocar el desequilibrio de macro y micronutrientes en el biodigestor. En particular, la monodigestión de sustancias lignocelulósicas, como la pulpa de café, presenta varias limitaciones como: la alta relación C/N que crea una deficiencia de nitrógeno, el riesgo de producir inhibidores (furfural e hidroximetilfurfural), una biomasa menos digerible, una alta demanda de calor y un tiempo de digestión prolongado debido a sus bajas tasas de conversión de celulosa, hemicelulosa y lignina (David et al., 2018). Con base en lo anterior, es evidente que un sistema de codigestión anaerobia necesita cierta reciprocidad de micro y macro nutrientes entre los componentes de la

mezcla para desarrollar su máxima eficiencia. Ello se ve reflejado en nuestros resultados, dado que la mezcla con la mayor cantidad de materia orgánica no fue la que más metano produjo (Tratamiento 100P con una DQO = 360 mg/L y una producción de 26.166 PPM en comparación con el tratamiento 70P30ARD con una DQO = 240 mg/L y una producción de 80 PPM).

Con base en todas las premisas anteriores, fue pertinente generar una matriz de correlación a través del índice de Pearson con el objetivo de cuantificar el grado de influencia, tanto de las variables independientes (proporciones de pulpa de café y ARD), como de las variables dependientes (pH, conductividad y DQO) en la producción de metano (Véase Tabla 16 y Figura 11). Al respecto, las hipótesis planteadas anteriormente se acogen a dicha prueba de relación estadística. Así, se identificó una correlación fuerte y positiva con la cantidad de pulpa de café, una correlación fuerte y negativa con la cantidad de ARD, una correlación fuerte y negativa con la variación del pH, una correlación negativa con la conductividad (cantidad de iones) y una relación negativa con la DQO (cantidad de materia orgánica).

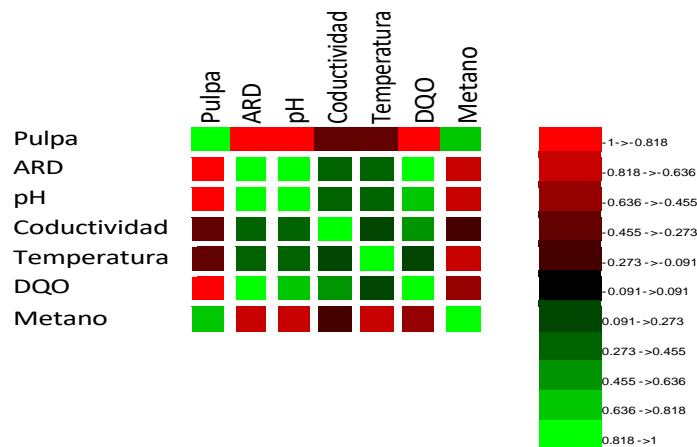
Tabla 16

Coefficientes de correlación de Pearson entre variables dependientes e independientes en la producción de metano

Variable	Pulpa de café	ARD	pH	Conductividad	DQO
Metano	0.7	-0.7	-0.683	-0.126	-0.533

Figura 11

Matriz de correlaciones de Spearman entre variables dependientes e independientes con la producción de metano.



El análisis de los porcentajes de pulpa de café y agua residual en relación con la producción de metano, denota la influencia de las proporciones de mezcla en la metanogénesis. Específicamente, las mezclas con una mayor proporción de pulpa de café exhibieron una mayor producción de metano, lo que enfatiza el potencial del café como sustrato para la producción de biogás. Estos resultados coinciden con investigaciones anteriores como las de Yin et al. (2019), que destacan el valor de los residuos orgánicos, como la pulpa de café, en la producción de biogás debido a su alta concentración de compuestos orgánicos biodegradables.

La variabilidad en la producción de metano entre diferentes mezclas denota la importancia de la proporción de componentes en la generación de metano y, por lo tanto, en la eficiencia del proceso de biodigestión anaerobia. La eficiencia del proceso de codigestión depende en gran medida de la relación óptima entre los sustratos, lo cual se alinea con los hallazgos presentados en este estudio (Angelidaki & Ellegaard, 2003).

3. Conclusiones

La codigestión anaerobia a escala de laboratorio de pulpa de café y ARD originarios del sector cafetero en la vereda El Suspiro (Municipio El Rosario, Nariño), permitió identificar que la producción de metano es en extremo sensible a la variación entre las proporciones de pulpa de café y ARD. Dado que, entre las 9 combinaciones establecidas, 7 fueron significativamente diferentes entre sí, mientras que tan solo 2 registraron producciones de metano similares. En ese sentido, la presente investigación sienta las bases para optimizar la producción de biogás a partir de residuos del sector cafetero en el departamento de Nariño, pues comprueba que el rendimiento en la producción de biogás mejora significativamente al variar las proporciones de pulpa de café y ARD. En particular se determinó que la proporción idónea para obtener la mayor producción de metano (80 PPM) fue una mezcla del 70% de pulpa de café con un 30% de ARD.

Entre las 9 proporciones de ARD y pulpa de café, la proporción 70P30ARD contó con la mayor eficiencia en la producción de metano, dado que estuvo 45.6 PPM sobre el promedio global de todo el experimento. En contraparte, la proporción 10P90ARD estuvo 23 PPM por debajo del promedio global. Ello denota como las diferencias físico-químicas registradas para cada mezcla, convergen en distintos niveles de eficiencia en el metabolismo metanogénico. Al respecto, es pertinente afirmar que la producción de metano en el presente contexto, cuenta con límites más laxos frente a proporciones elevadas de materia orgánica (pulpa de café), mientras que, en términos de ARD es menos permisiva. Sin embargo, la mezcla con mayor eficiencia en la producción de metano (70P30ARD) se encuentra a más de 20 PPM por arriba de la segunda mejor (90P10ARD), ello corrobora la necesidad de un equilibrio entre macro y micronutrientes, que permita modular a la baja los posibles efectos inhibitorios, tanto de la ARD como de la pulpa de café, en la comunidad microbiana encargada de producir el biogás.

Dado que la matriz de ARD y pulpa de café en la que ocurre el proceso de codigestión anaerobia es, en última instancia, un ecosistema microbiano donde se promueve el desarrollo de una comunidad de bacterias metanogénicas; la caracterización físico-química, tanto del ARD como de la pulpa de café, esclareció cuales son las propiedades de los sustratos donde la metanogénesis es eficiente. Al respecto, la caracterización realizada para ARD y pulpa de café por separado, señaló que ambos sustratos cuentan con propiedades idóneas para el desarrollo microbiano y acordes a las condiciones del sitio de origen. Sin embargo, la caracterización realizada a cada mezcla con

diferentes proporciones de sustratos, hizo evidente diferencias en términos de pH, conductividad y contenido de materia orgánica. Dichas diferencias son el eje transversal para comprender el nivel de eficiencia en la metanogénesis dentro de cada biodigestor. Al respecto, el pH presuntamente disminuyó gracias a la acumulación de ácidos grasos volátiles, que a su vez habrían sido generados por cantidades elevadas de materia orgánica, mientras que el contenido de iones (conductividad eléctrica) pudo influir en el equilibrio osmótico de las bacterias metanogénicas.

Como se ha expuesto en la presente disertación, el pH y la conductividad (explicada como el contenido de iones en una solución), fueron los parámetros con mayor influencia en el desarrollo del metabolismo microbiano envuelto en la metanogénesis. Al respecto, se identificó como elevadas proporciones de pulpa de café modulan el pH a la baja, mientras que elevadas proporciones de ARD modulan la conductividad al alta. Así, el monitoreo durante 9 semanas para ambos parámetros revelo que, a excepción de las mezclas 100 P y 90P10ARD, todas las demás mezclas se acoplan a un modelo lineal y cuentan con una estabilidad significativa en términos de pH y conductividad.

4. Recomendaciones

En primer lugar, sobre la base de los resultados de este estudio, es evidente que la utilización óptima de las proporciones de pulpa de café y aguas residuales es esencial para maximizar la producción de biogás. Por lo tanto, se recomienda que las fincas cafetaleras y las plantas de tratamiento de aguas residuales implementen sistemas precisos de monitoreo y control para asegurar que estas proporciones se mantengan dentro de los rangos óptimos. Esto no sólo mejorará la eficiencia de la producción de biogás, sino que también ayudará a reducir el desperdicio de recursos naturales.

En segundo lugar, es esencial mantener un control constante de la temperatura en los sistemas de digestión anaerobia. Aunque en este estudio se mantuvo una temperatura estable, debe prestarse especial atención a este factor en las aplicaciones prácticas. Una temperatura óptima es esencial para la actividad microbiana y, por tanto, para la producción de biogás. Se recomienda la implantación de sistemas de control avanzados para mantener la temperatura dentro de los rangos adecuados.

En tercer lugar, este estudio sienta las bases para futuras investigaciones en el campo de la codigestión de la pulpa de café y las aguas residuales. Es urgente realizar más estudios para comprender mejor las interacciones entre los componentes de la muestra y cómo influyen en la producción de biogás. Además, se pueden explorar técnicas de codigestión y pretratamientos de residuos más avanzados para mejorar la eficiencia y rentabilidad de estos procesos.

En cuarto lugar, es necesario acoplar herramientas de identificación microbiana a futuros investigaciones que pretendan optimizar la producción de biogás de la presente disertación. Dichas herramientas permitirán modular el ecosistema microbiano de tal modo que el metabolismo de las bacterias metanogénicas promisorias sea beneficiado. Particularmente, sugerimos el uso de metagenómica de amplicon dirigida a regiones de código de barras sobre marcadores moleculares específicos, una técnica que permite identificar todo tipo de microorganismos de manera masiva y en un corto lapso de tiempo, ello sin el uso de técnicas clásicas de cultivo y sus complicaciones asociadas.

En sexto lugar, sería pertinente esclarecer a través de que mecanismo influye la conductividad en la metanogénesis. Es decir, por un lado la conductividad puede modular la regulación del fenómeno osmótico en la célula, según la cantidad de iones; mientras que, por otro lado, puede que entre los iones se encuentren especies químicas inhibitorias que trunquen el metabolismo metanogénico. Frente a lo anterior sugerimos el uso de HPLC como una técnica más en la caracterización de ARD.

Por último, para lograr un impacto significativo en la sostenibilidad de la industria del café y la gestión de residuos, se recomienda promover la educación y la concienciación sobre estas prácticas. Las campañas educativas dirigidas a productores, procesadores y consumidores pueden desempeñar un papel importante en la promoción de prácticas más responsables y sostenibles en toda la cadena de suministro del café. Estas recomendaciones pretenden promover un enfoque más sostenible y responsable de la gestión de residuos y la producción de biogás en la industria del

Referencias bibliográficas

- Acarley, F. (2018). Evaluación de la producción de metano a partir de las aguas mieles del beneficio húmedo del café mediante digestión anaerobia [Tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3629/acarley-garcia-fullen-espiritu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Acarley, F., & Quipuzco, L. (2020). Producción de metano mediante digestión anaerobia de aguamiel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science*, 10(1), 7-16. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8085632.pdf>
- Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 1, 35-48. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- Álvarez, J. C. R., Smeltekop, H., Cuba, N., & Loza-Murguía, M. G. (2011). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del prebeneficiado de café (*Coffea arabica*) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 2(1), 34-42. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3741684.pdf>
- Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of Manure and Organic Wastes in Centralized Biogas Plants: Status and Future Trends. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 109(1-3), 95-106. <https://doi.org/10.1385/abab:109:1-3:95>
- Balseca, D., & Cabrera, J. (2011). Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café [Tesis para optar por el título de Ingeniero en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/eff8df2a-6cf4-4b6d-ae04-738885bf1bf6/content>

Bernal-Martinez, A. (2020). Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. In *ECORFAN eBooks* (pp. 115–141). <https://doi.org/10.35429/h.2020.8.115.141>

Botero, L. a. C. (2020). LA PARADOJA DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE MALA CALIDAD EN EL SECTOR RURAL COLOMBIANO. *Revista De Ingenieria*, *49*, 38–51.

<https://doi.org/10.16924/revinge.49.6>

Calpa, A. C. S., & Moncayo, C. R. T. (2016). Prospectiva del café en Nariño: Sabor y aroma de una tradición. *Revista Estrategia Organizacional*, *5*, 11–28. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7830559.pdf>

Cendales, E. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable [Tesis para optar por le título de Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia].

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7658/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cohello, S. M., & Jaramillo, J. L. (2023). Estudio de caso biogás como sistema complementario de combustible fósiles. In *Universidad De Guayaquil*. Retrieved February 25, 2024, from <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17070.28489>

Comité Departamental de Cafeteros de Nariño. (2008). Informe Comités de cafeteros 2008. In *Federación Nacional De Cafeteros De Nariños*. Retrieved February 23, 2024, from <https://federaciondefcafeteros.org/static/files/Nari%C3%B1o4.pdf>

David, A., Govil, T., Tripathi, A. K., McGeary, J., Farrar, K., & Sani, R. K. (2018). Thermophilic Anaerobic Digestion: Enhanced and Sustainable Methane Production from

Co-Digestion of Food and Lignocellulosic Wastes. *Energies*, 11(8), 2058.
<https://doi.org/10.3390/en11082058>

Daza, B., Salas, D., & Vargas, A. (2019). ACTIVIDAD METANOGÉNICA DE LODOS PROCEDENTES DE VILLAVICENCIO Y BUSBANZÁ, BOYACÁ. [Tesis para optar el título de Bacteriólogos y Laboratoristas Clínico, UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA].

De El Rosario Nariño, A. M. (2012). *Esquema de Ordenamiento Territorial El Rosario Nariño 2012: EOT El Rosario Nariño 2012.*

<https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/22695>

Del Real Olvera, J., & Gutiérrez, J. I. (2010). Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals).
<https://doaj.org/article/bb6c044aa0404e3a9fef72a95e96f6e8>

Deppenmeier, U., Müller, V., & Gottschalk, G. (1996). Pathways of energy conservation in methanogenic archaea. *Archives of Microbiology*, 165(3), 149–163.
<https://doi.org/10.1007/bf01692856>

Díaz, J., Sárvári, I., & Pereda, I. (2018). PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS RICOS EN GRASAS Y PROTEÍNAS: SINÉRGIA Y MICROBIOTA. 19 Convención Científica De Ingeniería Y Arquitectura.
https://www.researchgate.net/publication/339065633_PRODUCION_DE_BIOGAS_A_PARTIR_DE_RESIDUOS_RICOS_EN_GRASAS_Y_PROTEINAS_SINERGIA_Y_MICROBIOTA

Espinosa, K. G. (2021). *Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable: análisis del potencial de la ciudad de Quito* [Tesis de maestría, Universidad Andina Simón Bolívar]. <http://hdl.handle.net/10644/8410>

Federación Nacional de Cafeteros. (2022). RESUMEN EJECUTIVO INFORME DE GESTIÓN 2022. In *Federación Nacional De Cafeteros*. Retrieved February 25, 2024, from <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2023/05/Resumen-Ejecutivo-IG-2022.pdf>

FNC, Fundación Howard G. Buffett y Nespresso se unen para reactivar la caficultura en El Rosario, Nariño - Federación Nacional de Cafeteros. (2019, October 29). Federación Nacional De Cafeteros.

<https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/fnc-fundacion-howard-g-buffett-y-nespresso-se-unen-para-reactivar-la-caficultura-en-el-rosario-narino/>

Galván, M. J., Degano, S., Hilbert, J. A., & Montenegro, M. (2017, June 1). Caracterización y adaptación de sustratos de faena porcina para la producción de biogás mediante digestión anaeróbica. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/9417>

García, N. (2014). Influencia de la pulpa y agua de despulpado del café (*Coffea arabica*) sobre la producción de biogás con estiercol de bovino. [Tesis para optar por el título de Ingeniero Agroindustrial, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazona]. https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/1006/FIA_150.pdf?sequence=1&isAllowed=y

García-Mancha, N. (2016). *Tratamiento biológico de aguas residuales industriales mediante reactores anaerobios de alta eficacia* [Tesis de doctorado]. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/677073/garcia-mancha_delgado-ure%C3%B1a_nuria.pdf?sequence=1&isAllowed=n

Garnica, D., & Rivera, L. (2022). GÉNEROS DE ARCHAEAS METANOGÉNICAS PRESENTES EN BIODIGESTORES ANAEROBIOS Y SU RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS; REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA ENTRE LOS AÑOS 2000 A

2020. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/30313/Garnica%20Jimenez%20Diana%20Guadalupe%2C%20Rivera%20Burgos%20Lina%20Maria%2C%202022..pdf?sequence=1>

Gómez, J. S. S., Fuenzalida-Sandoval, E. A., Sánchez-Amézquita, L., Cassés-Franceschi, D., Rivera-Ramos, L. C., Reyes-Barrios, L. H., & Fajardo-Pinilla, J. M. (2020). Aprovechamiento del biosol producido por biodigestión anaerobia de porquinaza para la fertilización de rábano rojo. *Ontare*, 8, 89–105. <https://doi.org/10.21158/23823399.v8.n0.2020.2677>

Gonzalez, L. V. P., Gómez, S. P. M., & Abad, P. a. G. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(2), 141–150. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>

Granados-Moreno, Jairo Enrique, Abril-Herrera, Diego Andrés, & Mogollón-Reina, Andrés. (2022). Estudio biofísicoquímico de biodigestores alimentados con excretas porcinas y bovinas en la provincia Sumapaz, Colombia. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(3), e02. Epub 01 de septiembre de 2022. Recuperado en 28 de marzo de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542022000300002&lng=es&tlng=es.

Granda, C., & Martinez, J. (2020). DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DE ANAEROBIOSIS DEL AGUA MIEL DE CAFÉ EN LA FINCA CAFETALERA EL LIMÓN DEL DISTRITO DE CHIRINOS – CAJAMARCA, 2019 [Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Forestal e Industrial, Universidad Nacional de Jaén]. <https://core.ac.uk/download/pdf/337273762.pdf>

Hivos, Panhuysen, S., & Pierrot, J. (2014). Barómetro de Café 2014. In *Hivos People Unlimited-América Latina*. Retrieved February 23, 2024, from https://federaciondecafeteros.org/static/files/5Barometro_de_cafe2014.pdf

Huertas, P., & Adolfo, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Produccion + Limpia*, *10*(2), 142–159. <https://doi.org/10.22507/pml.v10n2a13>

Instituto de nutrición de Centro América y Panamá, Guatemala. (1978). *Pulpa de café: Composición, tecnología y utilización*.

Jiménez, J., 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>

Londoño, H. (2017). Aprovechamiento de pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón [Tesis para optar al título de Magíster en Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad Pontificia Bolivariana]. <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3297/APROVECHAMIENTO%20DE%20PULPA%20DE%20CAF%c3%89%20PARA%20LA%20PRODUCCI%c3%93N.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

López, O. L. O., & Herrera, L. M. Á. (2017). Tendencia de la producción y el consumo del café en Colombia. *Apuntes Del CENES*, *36*(64), 139–165. <https://doi.org/10.19053/01203053.v36.n64.2017.5419>

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *45*, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.03>

Martínez-Amariz, A., & Garrido-Silva, G. (2019). Uso de la biomasa de residuos orgánicos para el diseño de una estación eléctrica. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 167–176. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019015>

Matamoros, V. (2016). *Investigación sobre fermentaciones metánicas de desechos estacionales*. [Doctorado, Universidad politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/39412/1/VICTORIA_ALEJANDRA_CORTES_MATAMOROS.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Guía Ambiental para el Subsector Cafetero. In *Escuela Superior De Administración Pública*. Retrieved February 25, 2024, from <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/59>

Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). *El cambio climático: Causas, efectos y soluciones*. Fondo de Cultura Económica.

Novita, E. (2016). Biodegradability Simulation of coffee wastewater using instant coffee. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.138>

Olano, E. (2017). Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (*Coffea arabica*) en el Distrito de Copallín, Bagua – Amazonas, 2017 [Tesis para optar por le título Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. <https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/1637/Olano%20Requelm%20Edil.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ortiz, V. (2011). *Puesta a punto de una metodología para la determinación de la actividad metanogénica específica (AME) de un fango anaerobio mediante el sistema Oxytop*.

Influencia de las principales variables experimentales [Tesis de maestría, Universidad Politecnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/15711>

Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., Cárdenas-Cleves, L. M., Vásquez-Franco, C., Torres-López, W. A., & Ordóñez-Andrade, J. A. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de bio-residuos de origen municipal. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica/Revista Udca Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n2.2014.421>

Pérez, J., & Quinchía, Y. (2019). Revisión sistemática de parámetros de calidad de producción de biogás a partir de pulpa de café mediante digestión anaerobia [Tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/25667/%20%09yaquinchiaj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

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). <https://doi.org/10.22490/26653176.3521>

Ramirez, A. F. V., Ramírez, I. M., & Arroyave, A. F. (2022). Relación entre el PH y las mediciones de conductividad eléctrica en un suelo cultivable ubicado en Medellín, Colombia. *Ingenierías USBMed*, 13(2), 56-62. <https://doi.org/10.21500/20275846.4706>

Ramírez-Martínez, A., López-Escobar, L. A., Del Ángel-Coronel, O. A., & Nava-Valente, N. (2021). Potencial de biometanización de residuos del procesamiento de café. *REVISTA INTERNACIONAL DE DESARROLLO REGIONAL SUSTENTABLE*, 5(1). <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/71/75>

Rivera, B. G. (2022). *Generación de biogás a partir de residuos del beneficio húmedo del café* [Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad Peruana Unión]. <http://hdl.handle.net/20.500.12840/5236>

Romero, R. (2013). *Obtención de biogás como fuente de energía renovable a partir de los subproductos del café* [Universidad Nacional del Altiplano]. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5893937.pdf>

Rosa, R. (2015). *PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN SUSTRATO SÓLIDO MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE PULPA DE CAFÉ* [Tesis para optar por el título de Meagister en ingeniería Energetica, Universidad Veracruzana]. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41980/RosaCruzRuth.pdf;jsessionid=50800B995128A8AB90C3BB825A1AF916?sequence=1>

Soto, M., Ruiz, I., & Da Coruña Facultad de Ciencias, U. (2021). *Co-digestión anaerobia para la obtención de biogás a partir de residuos forestales*. <http://hdl.handle.net/2183/29172>

United Nations Environment Programme. (2021). *Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático. ¿Cómo podemos reducirlas?* UNEP. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como>

Vereda, A., & Lahoz, G. (2006). *Producción de biogás a partir de residuos vegetales*. Ingeniería Química. https://www.researchgate.net/publication/236590804_Produccion_de_biogas_a_partir_de_residuos_vegetales_I_Caracteristicas_etapas_y_limitaciones

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). *Optimisation of the*

anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>

Yin, C., Shen, Y., Yu, Y., Yuan, H., Liu, Z., & Zhu, N. (2019). In-situ biogas upgrading by a stepwise addition of ash additives: Methanogen adaption and CO₂ sequestration. *Bioresource Technology*, 282, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.110>

Zhang, L., Loh, K., & Zhang, J. (2019). Enhanced biogas production from anaerobic digestion of solid organic wastes: Current status and prospects. *Bioresource Technology Reports*, 5, 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.005>

Anexos

Anexo 1. Mediciones del peso, humedad, ceniza y carbohidratos de la pulpa de café.

Muestra	Peso	Humedad	Ceniza	Carbohidratos
Muestra 1	2,089	57,917	47,33	0,212
Muestra 1	2,082	59,487	33,33	0,102
Muestra 1	2,079	60,597	31,33	0,12
Muestra 1	2,042	65,999	28,33	0,95
Muestra 1	2,02	67,197	46,33	0,092
Muestra 2	2,021	59,287	37,33	0,053
Muestra 2	2,012	59,077	34,33	0,119
Muestra 2	2,096	64,187	32,33	0,97
Muestra 2	2,078	66,477	44,33	0,074
Muestra 2	1,967	68,017	38,33	0,067
Muestra 3	2,005	62,006	30,33	0,063
Muestra 3	2,003	62,624	35,33	0,98
Muestra 3	2,087	65,201	37,33	0,11
Muestra 3	2,064	59,698	35,33	0,087
Muestra 3	2,047	61,308	40,33	0,074

Anexo 2. Mediciones de pH, temperatura, conductividad, OD y SSD del ARD.

Muestra	pH	Temperatura	Conductividad	OD	SSD
1	7,49	20,6	3,6	1,75	0,00331
1	7,68	21,9	3,5	1,72	0,00339
1	7,55	20,9	3,8	1,71	0,0092
1	7,47	21,1	3,7	1,81	0,00405
1	7,52	20,8	3,3	1,7	0,00395
2	7,49	20,6	3,6	1,75	0,00441
2	7,68	21,9	3,5	1,72	0,00302
2	7,55	20,9	3,8	1,71	0,00315
2	7,47	21,1	3,7	1,81	0,00307
2	7,52	20,8	3,3	1,7	0,00369
3	7,49	20,6	3,6	1,75	0,00349
3	7,68	21,9	3,5	1,72	0,003182
3	7,55	20,9	3,8	1,71	0,00356
3	7,47	21,1	3,7	1,81	0,00401

3	7,52	20,8	3,3	1,7	0,00367
---	------	------	-----	-----	---------

Anexo 3. Mediciones de DBO5.

Muestra	Relacion	OD	OD5	DBO5
Muestra 1	1/300	1,713	1,369494	103,154
Muestra 1	1/300	1,728	1,263966	139,172
Muestra 1	1/300	1,807	1,357871	134,614
Muestra 1	1/300	1,741	1,334679	121,927
Muestra 1	1/300	1,744	1,313879	128,943
Blanco	300	6,512	6,512	0,000
Muestra 2	1/300	1,813	1,303523	152,982
Muestra 2	1/300	1,758	1,335158	126,937
Muestra 2	1/300	1,682	1,305694	112,993
Muestra 2	1/300	1,708	1,275819	129,588
Muestra 2	1/300	1,718	1,369157	104,770
Blanco	300	6,575	6,575	0,000
Muestra 3	1/300	1,792	1,35507	131,037
Muestra 3	1/300	1,754	1,292045	138,536
Muestra 3	1/300	1,756	1,275211	144,127
Muestra 3	1/300	1,743	1,335394	122,243
Muestra 3	1/300	1,714	1,271048	132,749
Blanco	300	6,919	6,919	0,000
Muestra 4	1/300	1,817	1,292986	157,091
Muestra 4	1/300	1,760	1,313682	133,867
Muestra 4	1/300	1,651	1,311972	101,849
Muestra 4	1/300	1,769	1,344408	127,336
Muestra 4	1/300	1,717	1,352746	109,335
Blanco	300	6,633	6,633	0,000
Muestra 5	1/300	1,691	1,340404	105,184
Muestra 5	1/300	1,728	1,275146	135,979
Muestra 5	1/300	1,693	1,313934	113,677
Muestra 5	1/300	1,706	1,293779	123,645
Muestra 5	1/300	1,710	1,296774	124,117
Blanco	300	6,644	6,644	0,000

Anexo 4. Mediciones DQO

Tratamiento	Volumen FAS Muestra	Volumen FAS Blanco	Concentración FAS	Volumen Muestra	DQO
100ARD	3,6	4,6	0,1	2,5	320
100ARD	4	4,6	0,1	2,5	192
100ARD	3,2	4,6	0,1	2,5	448
100P	3,45	4,6	0,1	2,5	368
100P	3,9	4,6	0,1	2,5	224
100P	3	4,6	0,1	2,5	512
10P90ARD	3,95	4,6	0,1	2,5	208
10P90ARD	4,3	4,6	0,1	2,5	96
10P90ARD	3,6	4,6	0,1	2,5	320
20P80ARD	3,95	4,6	0,1	2,5	208
20P80ARD	4,3	4,6	0,1	2,5	96
20P80ARD	3,6	4,6	0,1	2,5	320
30P70ARD	3,85	4,6	0,1	2,5	240
30P70ARD	3,9	4,6	0,1	2,5	224
30P70ARD	3,8	4,6	0,1	2,5	256
50P50ARD	3,95	4,6	0,1	2,5	208
50P50ARD	4	4,6	0,1	2,5	192
50P50ARD	3,9	4,6	0,1	2,5	224
70P30ARD	3,85	4,6	0,1	2,5	240
70P30ARD	4	4,6	0,1	2,5	192
70P30ARD	3,7	4,6	0,1	2,5	288
80P20ARD	4	4,6	0,1	2,5	192
80P20ARD	4,4	4,6	0,1	2,5	64
80P20ARD	3,6	4,6	0,1	2,5	320
90P10ARD	3,9	4,6	0,1	2,5	224
90P10ARD	4	4,6	0,1	2,5	192
90P10ARD	3,8	4,6	0,1	2,5	256

Anexo 5. Mediciones de pH en cada una de las mezclas durante 9 semanas.

Biodigestor	Semana	ValorPH
100P	1	6,06
100P	2	6,09
100P	3	7,09

Producción de biogás a partir de pulpa de café en codigestión con agua residual doméstica

100P	4	6,11
100P	5	7,12
100P	6	6,15
100P	7	7,18
100P	8	7,21
100P	9	6,22
90P10ARD	1	5,07
90P10ARD	2	5,09
90P10ARD	3	6,08
90P10ARD	4	5,09
90P10ARD	5	6,1
90P10ARD	6	5,11
90P10ARD	7	5,15
90P10ARD	8	5,16
90P10ARD	9	5,16
80P20ARD	1	6,05
80P20ARD	2	6,05
80P20ARD	3	6,07
80P20ARD	4	6,11
80P20ARD	5	7,12
80P20ARD	6	6,45
80P20ARD	7	7,13
80P20ARD	8	7,18
80P20ARD	9	7,18
70P30ARD	1	6,09
70P30ARD	2	6,32
70P30ARD	3	6,48
70P30ARD	4	6,12
70P30ARD	5	7,12
70P30ARD	6	7,14
70P30ARD	7	7,16
70P30ARD	8	7,19
70P30ARD	9	7,2
50P50ARD	1	7,11
50P50ARD	2	7,11
50P50ARD	3	7,13
50P50ARD	4	7,15
50P50ARD	5	7,14
50P50ARD	6	7,14
50P50ARD	7	7,17
50P50ARD	8	7,2
50P50ARD	9	7,21
30P70ARD	1	7,12

30P70ARD	2	7,13
30P70ARD	3	7,14
30P70ARD	4	7,15
30P70ARD	5	7,15
30P70ARD	6	7,17
30P70ARD	7	7,21
30P70ARD	8	7,21
30P70ARD	9	7,22
20P80ARD	1	7,15
20P80ARD	2	7,16
20P80ARD	3	7,16
20P80ARD	4	7,18
20P80ARD	5	7,19
20P80ARD	6	7,18
20P80ARD	7	7,21
20P80ARD	8	7,22
20P80ARD	9	7,22
10P90ARD	1	7,18
10P90ARD	2	7,18
10P90ARD	3	7,18
10P90ARD	4	7,19
10P90ARD	5	7,2
10P90ARD	6	7,2
10P90ARD	7	7,19
10P90ARD	8	7,2
10P90ARD	9	7,21
100ARD	1	7,19
100ARD	2	7,19
100ARD	3	7,2
100ARD	4	7,21
100ARD	5	7,21
100ARD	6	7,21
100ARD	7	7,22
100ARD	8	7,22
100ARD	9	7,22

Anexo 6. Mediciones de conductividad en cada una de las mezclas durante 9 semanas.

Biodigestor	Semana	Conductividad
100P	1	4,129
100P	2	4,149

Producción de biogás a partir de pulpa de café en codigestión con agua residual doméstica

100P	3	4,831
100P	4	4,163
100P	5	4,851
100P	6	4,19
100P	7	4,892
100P	8	4,912
100P	9	4,238
90P10ARD	1	3,454
90P10ARD	2	3,468
90P10ARD	3	4,143
90P10ARD	4	3,468
90P10ARD	5	4,156
90P10ARD	6	3,482
90P10ARD	7	3,509
90P10ARD	8	3,516
90P10ARD	9	3,516
80P20ARD	1	4,122
80P20ARD	2	4,122
80P20ARD	3	4,136
80P20ARD	4	4,163
80P20ARD	5	4,851
80P20ARD	6	4,395
80P20ARD	7	4,858
80P20ARD	8	4,892
80P20ARD	9	4,892
70P30ARD	1	4,149
70P30ARD	2	4,306
70P30ARD	3	4,415
70P30ARD	4	4,17
70P30ARD	5	4,851
70P30ARD	6	4,865
70P30ARD	7	4,878
70P30ARD	8	4,899
70P30ARD	9	4,906
50P50ARD	1	6,344
50P50ARD	2	6,344
50P50ARD	3	6,358
50P50ARD	4	6,372
50P50ARD	5	6,365
50P50ARD	6	6,365
50P50ARD	7	6,385
50P50ARD	8	6,406
50P50ARD	9	6,412

30P70ARD	1	6,551
30P70ARD	2	6,558
30P70ARD	3	6,565
30P70ARD	4	6,572
30P70ARD	5	6,572
30P70ARD	6	6,585
30P70ARD	7	6,612
30P70ARD	8	6,612
30P70ARD	9	6,619
20P80ARD	1	6,672
20P80ARD	2	6,678
20P80ARD	3	6,678
20P80ARD	4	6,692
20P80ARD	5	6,699
20P80ARD	6	6,692
20P80ARD	7	6,712
20P80ARD	8	6,719
20P80ARD	9	6,719
10P90ARD	1	6,792
10P90ARD	2	6,792
10P90ARD	3	6,792
10P90ARD	4	6,799
10P90ARD	5	6,806
10P90ARD	6	6,806
10P90ARD	7	6,799
10P90ARD	8	6,806
10P90ARD	9	6,812
100ARD	1	6,899
100ARD	2	6,899
100ARD	3	6,906
100ARD	4	6,912
100ARD	5	6,912
100ARD	6	6,912
100ARD	7	6,919
100ARD	8	6,919
100ARD	9	6,919

Anexo 7. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado al pH ajustado a su respectivo biorreactor.

Modelo	Residual_min	Residual_1Q	Residual_mediano	Residual_3Q	Residual_max	Estimate_Intercept
100P	-0,642	-0,401	-0,240	0,458	0,650	6,229
90P10ARD	-0,349	-0,266	-0,142	-0,090	0,766	5,440
80P20ARD	-0,316	-0,178	-0,025	0,148	0,527	5,729
70P30ARD	-0,481	-0,039	0,034	0,088	0,362	5,972
50P50ARD	-0,023	-0,006	0,004	0,010	0,012	7,089
30P70ARD	-0,017	-0,003	0,000	0,003	0,017	7,100
20P80ARD	-0,015	-0,003	0,002	0,004	0,006	7,139
10P90ARD	-0,009	-0,003	0,001	0,004	0,008	7,175
100ARD	-0,005	-0,002	0,000	0,002	0,006	7,187

Anexo 7. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado al pH ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).

Modelo	Std_Error_Intercept	t_value_Intercept	Pr_Intercept	Estimate_Semana	Std_Error_Semana	t_value_Semana
100P	0,394	15,816	9.79e-07	0,070	0,070	1,005
90P10ARD	0,331	16,450	7.47e-07	-0,021	0,059	-0,360
80P20ARD	0,209	27,399	2.21e-08	0,173	0,037	4,651
70P30ARD	0,186	32,037	7.47e-09	0,157	0,033	4,745
50P50ARD	0,009	757,340	< 2e-16	0,012	0,002	7,414
30P70ARD	0,007	954,840	< 2e-16	0,013	0,001	10,090
20P80ARD	0,005	1307,225	< 2e-16	0,009	0,001	9,617
10P90ARD	0,004	1759,420	< 2e-16	0,004	0,001	4,830
100ARD	0,003	2452,602	< 2e-16	0,004	0,001	8,002

Anexo 7. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado al pH ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).

Modelo	Pr_Semana	Residual_Sum of Squares	Multiple_R_squared	Adjusted_R_squared	F_statistic	p_value
100P	0.348	0,542	0,126	0,001	1,01	0.3484
90P10ARD	0.729	0,455	0,018	-0,122	0,1298	0.7293
80P20ARD	0.00234	0,288	0,756	0,721	21,63	0.002338
70P30ARD	0.0021	0,257	0,763	0,729	22,51	0.002097
50P50ARD	0.000148	0,013	0,887	0,871	54,97	0.0001476
30P70ARD	2.02e-05	0,010	0,936	0,927	101,8	2.016e-05

20P80ARD	2.77e-05	0,008	0,930	0,920	92,49	2.765e-05
10P90ARD	0.0019	0,006	0,769	0,736	23,33	0.0019
100ARD	9.1e-05	0,004	0,901	0,887	64,02	9.104e-05

Anexo 8. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado a la conductividad ajustado a su respectivo biorreactor.

Modelo	Residual_min	Residual_1_Q	Residual_median	Residual_3_Q	Residual_max	Estimate_Intercept	Std_Error_Intercept
100P	-0,4375	-0,2730	-0,1633	0,3123	0,4429	4,2444	0,2684
90P10ARD	-0,2381	-0,1810	-0,0969	-0,0612	0,5213	3,7065	0,2253
80P20ARD	-0,2151	-0,1208	-0,0170	0,1007	0,3587	3,9035	0,1424
70P30ARD	-0,3272	-0,0268	0,0231	0,0594	0,2467	4,0687	0,1269
50P50ARD	-0,0158	-0,0042	0,0025	0,0060	0,0084	6,3303	0,0064
30P70ARD	-0,0109	-0,0019	0,0001	0,0022	0,0111	6,5378	0,0049
20P80ARD	-0,0100	-0,0019	0,0016	0,0033	0,0044	6,6641	0,0037
10P90ARD	-0,0062	-0,0016	0,0009	0,0020	0,0056	6,7885	0,0028
100ARD	-0,0035	-0,0015	-0,0001	0,0012	0,0040	6,8969	0,0019

Anexo 8. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado a la conductividad ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).

Modelo	t_value_Intercept	Pr_Intercept	Estimate_Semana	Std_Error_Semana	t_value_Semana	Pr_Semana
100P	15,81500	9.8e-07	0,04790	0,04769	1,00400	0,34900
90P10ARD	16,45100	7.48e-07	-0,01437	0,04004	-0,35900	0,73000
80P20ARD	27,41600	2.2e-08	0,11780	0,02530	4,65400	0,00233
70P30ARD	32,05000	7.44e-09	0,10713	0,02256	4,75000	0,00208
50P50ARD	996,16400	< 2e-16	0,00842	0,00113	7,45300	0,00014
30P70ARD	1333,36000	< 2e-16	0,00902	0,00087	10,35000	0,00002

20P80A RD	1789,26500	< 2e-16	0,00632	0,00066	9,54400	0,00003
10P90A RD	2431,23600	< 2e-16	0,00238	0,00050	4,80300	0,00196
100AR D	3614,57000	< 2e-16	0,00277	0,00034	8,15900	0,00008

Anexo 8. Resúmenes estadísticos para cada modelo de regresión lineal asociado a la conductividad ajustado a su respectivo biorreactor (continuación).

Modelo	Residual_S E	Multiple_R_squar ed	Adjusted_R_squar ed	F_statistic	p_value
100P	0,36940	0,12600	0,00109	1,00900	0,34870
90P10AR D	0,31010	0,01806	-0,12220	0,12880	0,73030
80P20AR D	0,19600	0,75580	0,72090	21,66000	0,00233
70P30AR D	0,17470	0,76320	0,72940	22,56000	0,00208
50P50AR D	0,00875	0,88810	0,87210	55,55000	0,00014
30P70AR D	0,00675	0,93860	0,92990	107,10000	0,00002
20P80AR D	0,00513	0,92860	0,91840	91,08000	0,00003
10P90AR D	0,00384	0,76720	0,73400	23,07000	0,00196
100ARD	0,00263	0,90490	0,89130	66,58000	0,00008

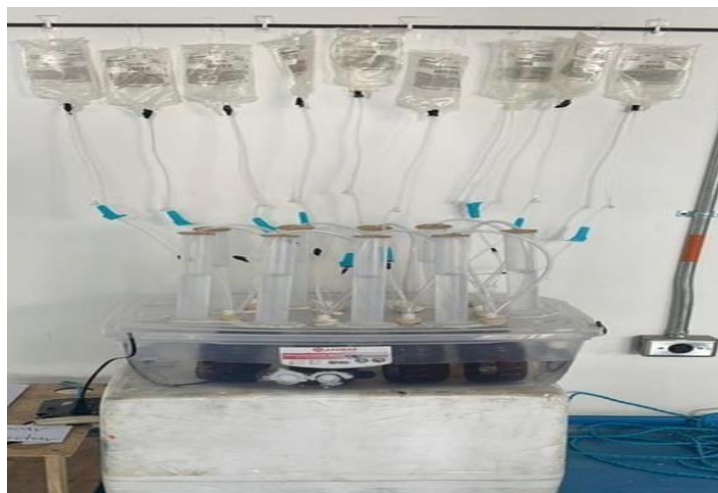
Anexo 9. Mediciones de metano para cada biodigestor.

PulARD	ValorCH4
100P	28
100P	25
100P	29
100P	26
100P	24
100P	25
90P10ARD	56
90P10ARD	59
90P10ARD	58
90P10ARD	60

90P10ARD	57
90P10ARD	57
80P20ARD	42
80P20ARD	46
80P20ARD	41
80P20ARD	44
80P20ARD	47
80P20ARD	40
70P30ARD	82
70P30ARD	80
70P30ARD	81
70P30ARD	78
70P30ARD	79
70P30ARD	80
50P50ARD	38
50P50ARD	35
50P50ARD	37
50P50ARD	33
50P50ARD	34
50P50ARD	36
30P70ARD	34
30P70ARD	31
30P70ARD	30
30P70ARD	28
30P70ARD	29
30P70ARD	27
20P80ARD	20
20P80ARD	23
20P80ARD	21
20P80ARD	19
20P80ARD	17
20P80ARD	20
10P90ARD	15
10P90ARD	11
10P90ARD	9
10P90ARD	10
10P90ARD	12
10P90ARD	11
100ARD	5
100ARD	6
100ARD	8
100ARD	3
100ARD	4

100ARD 7

Anexo 10. Reactores escala laboratorio



Anexo 11. Presupuesto

RUBRO	JUSTIFICACION	UNIVERSIDAD	ESTUDIANTES	VALOR
		MARIANA		TOTAL
		ESPECIE	ESPECTIVO ESPECIFICO	
Transporte	Movilización hasta la finca y salidas cafetera, laboratorios, ida y de campo vuelta		\$200.000	\$200.000
Recursos humanos	Horas asesor y estudiante	\$360.000	\$1.800.000	\$2.160.000
Biomasa	Pulpa de café		\$20.000	\$20.000
Materiales	Elementos de bioscouridad (bata. Cofias, tapabocas guantes), materiales para la toma de muestra(bolsas	\$8.500.000	\$139.000	\$8.639.000

	plásticas de 5 kg, botellas plasticas de 2l)manguera de plásticas, corchos para el diseño experimental,ph- metro,cromatografo,fotometro y reactivos.			
Viáticos	Alimentación y hospedaje en la zona de muestreo		\$50.000	\$50.000
software	Licencias de Office y ArcGis	\$304.000		\$304.000
Total		\$90164.000	\$1.850.000	\$11.374.000

Anexo 12. Valores de pH, conductividad y temperatura para cada mezcla de agua residual y pulpa de café.

Bidigestor	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
100ARD	6.463 ± 0.678	4.098 ± 0.199	22.100 ± 0.497
100P	5.582 ± 0.333	0.001 ± 0.000	22.089 ± 0.641
10P90ARD	5.807 ± 0.519	6.907 ± 0.637	22.111 ± 0.625
20P80ARD	5.947 ± 0.416	0.001 ± 0.000	21.811 ± 0.639
30P70ARD	5.855 ± 0.510	4.289 ± 0.554	21.704 ± 0.804
50P50ARD	5.761 ± 0.497	6.908 ± 0.436	21.581 ± 0.830
70P30ARD	5.654 ± 0.555	0.001 ± 0.000	21.407 ± 0.897
80P20ARD	5.451 ± 1.110	3.714 ± 0.913	21.711 ± 0.840
90P10ARD	5.744 ± 0.357	6.620 ± 0.781	22.089 ± 0.573

