



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN MESITAS DEL COLEGIO MEDIANTE LA DIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS BIODEGRADABLES

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Jeison Andrés Mejía Hernández

Dagoberto Guerrero Vergel

Director:

Vivian Estefania Beltrán Parada

Codirector

Maria Fernanda Gomez Galindo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a nuestros seres queridos, cuyo amor incondicional y constante apoyo han sido la fuerza impulsora detrás de cada paso que hemos dado. A nuestros padres, Dagoberto Guerrero Carrascal y Yamile Vergel Ortiz, así como a Jairo Mejía y Luz Dary Hernández, les expresamos nuestra gratitud por su infinita paciencia y profundo amor, elementos que nos han permitido no solo crecer, sino florecer, tanto personal como profesionalmente.

A Ludivia Hernández, le dedicamos un espacio especial en nuestras reflexiones, agradeciéndole por su sabiduría y la luz de sus consejos que han iluminado nuestro camino. A Fernando Gutiérrez, le dedicamos este logro, reconociendo su entusiasmo contagioso y su capacidad para infundirnos la motivación necesaria para superar los desafíos que se nos presentaron.

Y a María Alexandra Marín, le dedico mi más profundo agradecimiento por su amor incondicional y comprensión, pilares que han sostenido mi equilibrio entre lo personal y lo profesional.

Este proyecto no solo es nuestro logro, sino también el reflejo del amor, el apoyo y la guía que hemos recibido de cada uno de ustedes. Vuestras presencias han sido las piezas clave en nuestro viaje, y esperamos que este trabajo sirva como un modesto homenaje a la influencia positiva que han tenido en nuestras vidas. Con todo nuestro amor y gratitud, este proyecto es dedicado a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a Vivian Estefanía Beltrán Parada, directora de nuestro Proyecto de Grado, y a María Fernanda Gómez Galindo, Codirectora de este. Vuestra orientación experta, dedicación y apoyo constante fueron fundamentales para llevar a cabo este proyecto con éxito.

Vivian, tu liderazgo inspirador y tus valiosos aportes fueron un faro que nos guio en cada etapa de este proceso. María Fernanda, tu visión nos brindaron una perspectiva enriquecedora y una guía invaluable para sortear los desafíos que encontramos en el camino.

Vuestra confianza en nuestro trabajo y compromiso con nuestro crecimiento profesional han sido un regalo invaluable. Estamos profundamente agradecidos por esta dedicación y por la oportunidad de aprender de esa experiencia y sabiduría que a lo largo de estos años han forjado.

Este logro no habría sido posible sin su apoyo incondicional y compromiso con nuestra formación académica. Con todo nuestro corazón, agradecemos por su invaluable contribución a este proyecto y por ser pilares fundamentales en nuestro camino hacia el éxito.

RESUMEN

El presente proyecto plantea un estudio de factibilidad técnica y económica para la implementación de un sistema de digestión anaeróbica en el municipio de Mesitas del Colegio del departamento de Cundinamarca, el cual permitirá gestionar los residuos orgánicos biodegradables generados en la producción de la cosecha del banano. El propósito de este proyecto surge a partir de la necesidad de abordar los desafíos ambientales como el aprovechamiento de residuos, y a servicios esenciales como el suministro de Gas Natural en el municipio de Mesitas del Colegio, debido a el acceso limitado de los mismos, el cual surge a partir de la ausencia de conexiones a la tubería del gas natural del municipio al sistema nacional de transporte (RED) y la conexión de tuberías a algunas viviendas. Así mismo, el transporte Gas Natural virtual (GNC) se ha visto limitado por la infraestructura vial de acceso al municipio (vías angostas y concurridas), lo cual genera que los habitantes recurran a alternativas más costosas y menos eficientes, afectando negativamente su calidad de vida y su crecimiento económico.

El estudio cuenta con i) la indagación preliminar sobre el uso de los residuos orgánicos agrícolas para la generación de biogás en municipio de Mesitas, ii) el análisis de las características físicas y químicas del cultivo seleccionado, iii) el cálculo determinante en el potencial de digestión anaeróbica para la generación de biogás incluyendo el aprovechamiento de los residuos en etapa de cosecha y post cosecha a nivel municipal y por finca/residencia, iv) el diseño de digestores para los escenarios municipal y por finca/residencia, finalmente, v) se presenta la viabilidad técnica y económica del sistema de digestión anaeróbica dimensionado.

De acuerdo con lo anterior, el proyecto busca ofrecer soluciones innovadoras para la gestión de residuos y la satisfacción de servicios esenciales, que genere beneficios económicos y sociales tangibles para la comunidad local, promoviendo prácticas más eficientes y sostenibles en el manejo de estos, incursionando en el uso de fuentes de energía renovable, beneficiando tanto al ambiente como al desarrollo sostenible del municipio.

ABSTRACT

This project proposes a technical and economic feasibility study for the implementation of an anaerobic digestion system in the municipality of Mesitas del Colegio in the department of Cundinamarca, aiming to manage the biodegradable organic waste generated from the banana crop production. The project stems from the need to address environmental challenges, such as waste utilization, and to provide essential services like natural gas supply in Mesitas del Colegio, where access is limited. This limitation arises from the lack of pipeline connections linking the municipal gas network to the national transportation system (RED) and restricted connections to residential homes. Furthermore, virtual natural gas (CNG) transport is hindered by the municipality's narrow and busy roads, which leads residents to rely on more expensive and less efficient alternatives, which has a negative impact in their quality of life and economic growth.

The study includes: i) a preliminary research on the use of agricultural organic waste for biogas generation in Mesitas, ii) an analysis of the physical and chemical characteristics of the selected crop, iii) a calculation of the anaerobic digestion potential for biogas generation, encompassing the use of harvest and post-harvest waste at both municipal and household levels, iv) the design of digesters for both municipal and household scenarios, and finally, v) an assessment of the technical and economic feasibility of the scaled anaerobic digestion system.

In summary, the project seeks to offer innovative solutions for waste management and essential service delivery, providing tangible economic and social benefits for the local community. It promotes more efficient and sustainable practices, exploring renewable energy sources that benefit both the environment and the sustainable development of the municipality.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS	5
1.1 Objetivo general.....	5
1.2 Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	6
CAPÍTULO 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	11
4.1 MARCO TEÓRICO.....	11
4.1.1 Biomasa.....	11
4.1.2 Digestión Anaerobia	12
4.1.3 Tipos de Biodigestores.....	14
4.1.4 Variables Clave.....	18
4.1.5 Estudio de Factibilidad	20
4.2 ESTADO DEL ARTE.....	22
CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA	26
CAPÍTULO 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
6.1 SELECCIÓN DE BIOMASA RESIDUAL.....	33
6.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO.....	35
6.3 DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	38
6.3.1 Sistema de Biodigestor Municipal.....	42
6.3.2 Sistema de Biodigestor Familiar.....	51
6.4 VIABILIDAD ECONÓMICA.....	55
6.4.1. Sistema de Biodigestor Municipal.....	55
6.4.2 Sistema de Biodigestor Familiar.....	74
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	86
BIBIOGRAFÍA.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de biodigestores.....	17
Tabla 2. Características de tipos de alimentación.....	18
Tabla 3. Producción agrícola de Mesitas del colegio en 2022.....	33
Tabla 4. Masa de residuos del banano de municipio Mesitas del Colegio, propiedades físicas y químicas de los residuos del cultivo de banano.....	37
Tabla 5. Potencial de generación de residuo de biogás de fincas de 5 ha.....	39
Tabla 6. Porcentaje de materia seca orgánica de cada sustrato y generación de biogás...	40
Tabla 7. Volumen Biodigestor Municipal	43
Tabla 8. Volumen de digestor Familiar.	52
Tabla 9. Información Biodigestor familiar	53
Tabla 10. Costos montaje planta de aprovechamiento de residuos orgánicos.....	56
Tabla 11. Adecuaciones locativas zona de compresión.....	58
Tabla 12. Costos zona de biodigestión	60
Tabla 13. Gastos de Registros legales.....	61
Tabla 14. Valor Registros Sanitario.....	62
Tabla 15. Costos Anuales de operación.....	62
Tabla 16. Liquidación prestacional 2024.....	64
Tabla 17. Personal de la planta	65
Tabla 18. Préstamo.....	66
Tabla 19. Depreciación	68
Tabla 20. Escenarios Biol.	70
Tabla 21 Posibles ingresos Biol.....	70
Tabla 22. Flujo de caja VPN y TIR (COP).....	72
Tabla 23. Propuesta 1 Biodigestor familiar	75
Tabla 24. Propuesta 2 Biodigestor Familiar	77
Tabla 25. Valor Instalación Gas Natural.....	78
Tabla 26. Costos Mantenimiento 30 años biodigestor.....	79
Tabla 27. Costos Gas Natural a 30 años	79
Tabla 28. Costos totales	80
Tabla 29 Producción de Biol anual.....	80
Tabla 30. Costos anuales venta de Biol	81
Tabla 31. Flujo de Caja VPN y TIR Biodigestor familiar	82
Tabla 32. Comparación rango de presión y temperatura	84
Tabla 33. Durabilidad y Mantenimiento	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general digestión anaerobia	13
Figura 2. Biodigestor domo fijo.....	15
Figura 3. Biodigestor domo móvil.....	15
Figura 4. Biodigestor tubular.....	16
Figura 5. Metodología.....	26
Figura 6. Vástago	34
Figura 7. Rechazo del banano	35
Figura 8. Largo del Biodigestor.....	44
Figura 9. Procesos físicos químicos.....	45
Figura 10. Sistema de almacenamiento	47
Figura 11. Ilustración de proceso de tratamiento de biogás.....	48
Figura 12. Sistema de antorcha o tea	49
Figura 13. Sistema de Mezclado en biodigestores.....	50
Figura 14. Planos planta de aprovechamiento de residuos orgánicos.....	51
Figura 15. Tamaño Biodigestor Familiar.....	53
Figura 16. Biodigestor Familiar.....	54
Figura 17. Costo aproximado de importación maquinaria.....	59

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La producción de biogás es una solución que se viene presentando a nivel mundial debido a que es un combustible de fuente renovable que puede usarse para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas: eléctrica, térmica o como carburante. Una de las formas de generación de gas metano es mediante la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos [1] .

Además de la producción de gas metano, el adecuado aprovechamiento de residuos también aporta beneficios, como la reducción de la huella de carbono y el impacto ambiental de las actividades domésticas e industriales [2]. La utilización de los residuos permite a las empresas utilizar sus recursos y obtener materiales de forma más eficiente, comprometiéndolas así con la economía circular [2].

El abastecimiento de gas natural en zonas alejadas a los centros urbanos representa una problemática por el difícil acceso a líneas de abastecimiento e industria que llegue a estas zonas de baja población en grandes áreas, en el año 2022 la Encuesta Nacional de Calidad de vida, obtuvo que 12 millones de hogares contaban con servicio de gas natural representando el 68.6 % del total nacional [3].

Dada la importancia del tema, el estudio analiza la factibilidad técnica y económica para la producción de biogás en el municipio de Mesitas del Colegio, a través de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos, centrándose específicamente en la biomasa residual del cultivo del banano. Esta iniciativa surge en respuesta a las dificultades que enfrenta la población de Mesitas del Colegio para acceder al servicio de gas natural. Esto se debe a que el municipio no está interconectado al Sistema Nacional de Transporte de Gas Natural (SNT). Dicho sistema agrupa los gasoductos que se extienden por el territorio nacional (excluyendo conexiones y gasoductos dedicados) y que conectan los centros de

producción de gas con las puertas de ciudad, los sistemas de distribución y los usuarios no regulados.

Mesitas del Colegio ubicado en Cundinamarca, es uno de estos municipios que presenta esta problemática, y a su vez, cuenta con potenciales de generación de biomasa por ser una zona de producción agrícola; situación que al ser aprovechada brinda una solución al abastecimiento de gas natural, apoyándose en la digestión anaeróbica.

A pesar de la existencia del suministro virtual de gas natural en la zona, hay hogares que no pueden acceder a este servicio, en este sentido, la empresa Vanti S.A ESP reporta que en 2022 la cobertura en Mesitas del Colegio es de 4.287 de un total de 4.472 usuarios residenciales y 73 comerciales conectados, teniendo una cobertura del 95.86 % del municipio, lo que refleja que 185 usuarios no cuentan con este servicio básico [4] [5]. Este proyecto se plantea como una solución para beneficiar directamente a estos usuarios, además de tener potencial para ser replicado en otros municipios. No obstante, el estudio también permitirá a otros usuarios que cuenten con gas natural tener esta alternativa apoyando la transición energética.

En el presente documento se plantean dos alternativas para el aprovechamiento de residuos orgánicos generados en la cosecha y postcosecha del cultivo de banano en el municipio de mesitas para la generación de biogás. Los escenarios son: i) Se propone recolectar y aprovechar todos los residuos del municipio para dimensionar un sistema de digestión anaerobia municipal que permita producir biogás para uso doméstico y residencial. ii) Se propone recolectar y aprovechar los residuos de las fincas productoras de banano para la generación de biogás a una menor escala para su consumo interno

El propósito final de este estudio es contribuir al desarrollo sostenible del municipio, promoviendo la implementación de tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa residual. Los resultados podrán fundamentar el proceso de toma de decisiones

para la implementación de un proyecto de digestión anaerobia y fomentar el uso del biogás como fuente de energía sostenible en Mesitas del Colegio y en municipios con características agrícolas similares. Este enfoque tiene el potencial de ampliar el acceso a fuentes de energía más limpias y de optimizar la gestión de residuos orgánicos mediante su conversión en biogás y Biol, lo que podría redundar en una mejora integral de la calidad de vida de la población.

El estudio cuenta con cuatro secciones que abarcan i) la indagación preliminar sobre el uso de los residuos orgánicos agrícolas para la generación de biogás, ii) el análisis de las características físicas y químicas de los residuos de los cultivos de banano en mesitas del colegio, iii) el cálculo determinante en el potencial de generación de digestión anaeróbica de biogás incluyendo el aprovechamiento de los residuos en etapa de cosecha y post cosecha y finalmente, iv) se presenta la viabilidad técnica y económica del sistema de digestión anaeróbica dimensionado en dos escalas: municipal y residencial.

La Aplicación de este proyecto y el biogás ofrece beneficios ambientales clave al sustituir energías contaminantes, reducir emisiones de GEI y producir Biol que mejoran la calidad del suelo y promueven prácticas agrícolas sostenibles, impulsando una economía circular [6]. Además, mitiga la exposición a combustibles contaminantes, mejora la calidad del aire y la salud pública, y diversifica el acceso a energía sostenible en zonas rurales, fortaleciendo la estabilidad energética y la producción agrícola mediante Biol [6].

El marco normativo colombiano respalda su integración: la Ley 1715 de 2014, la Resolución 240 de 2016 y el Plan Energético Nacional 2022-2052 fomentan las renovables, mientras las Leyes 2128 y 2099 de 2021 facilitan la sustitución de fósiles y la financiación de proyectos [7]. Los biodigestores, adaptables para cocina, calentadores y herramientas agrícolas, mejoran la calidad de vida en fincas y optimizan la producción mediante Biol [8].

Colombia tiene un potencial de 10.447 Tera julios anuales de biogás, equivalente al 8% del suministro de gas natural en 2012, destacando su rol en la diversificación energética y descarbonización, según Naturgas [9]. Este recurso contribuye a los ODS: fin de la pobreza (ODS 1) mediante ingresos adicionales, energía asequible (ODS 7) al reducir dependencia de fósiles, comunidades sostenibles (ODS 11) con energía local, y acción climática (ODS 13) al evitar emisiones [6].

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Determinar la factibilidad técnica y económica de un sistema de digestión anaerobia para producción de biogás para uso doméstico/residencial utilizando residuos orgánicos generados en el municipio de Mesitas.

1.2 Objetivos específicos

Objetivo 1. Seleccionar un tipo de residuo orgánico producido en Mesitas de acuerdo con su disponibilidad y sus características físicas y químicas para procesar mediante digestión anaerobia.

Objetivo 2. Determinar el potencial de generación de digestión anaerobia de biogás de los residuos seleccionados.

Objetivo 3. Dimensionar el sistema de digestión anaerobia para el aprovechamiento de los residuos seleccionados, utilizando tecnologías comercialmente disponibles.

Objetivo 4. Analizar la viabilidad económica para la implementación del sistema de digestión anaerobia dimensionado.

CAPÍTULO 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Gran parte de los gases de efecto invernadero que envuelven la Tierra y retienen el calor solar provienen de la producción de energía, la cual se genera principalmente mediante la quema de combustibles fósiles para generar electricidad y calor. Los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, son los principales responsables del calentamiento global, ya que contribuyen con más del 75 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y alrededor del 90 % de las emisiones de dióxido de carbono [10].

Para evitar las consecuencias más graves del cambio climático, se debe reducir a la mitad las emisiones para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono en 2050. Para conseguir este objetivo, es imprescindible abandonar la dependencia de los combustibles fósiles e impulsar la inversión en fuentes de energía alternativas que sean limpias, accesibles, asequibles, sostenibles y confiables [10].

Las energías renovables, abundantes en nuestro entorno, ya sea del sol, el viento, el agua, los desechos o el calor de la tierra, se regeneran de manera natural y emiten pocas o ninguna cantidad de contaminantes y gases de efecto invernadero. A pesar de que los combustibles fósiles aún representan más del 80 % de la producción de energía a nivel global, las fuentes de energía limpia están ganando terreno, y actualmente alrededor del 29 % de la electricidad a nivel global proviene de energías renovables [10].

Sin embargo, el aumento global de consumo energético acelerado en el 2023 del 2.2% a comparación del promedio de 2021-2019 de 1.5% ha generado preocupaciones sobre la capacidad de satisfacerla de manera sostenible [11]. Por ello, es imperativo diversificar las fuentes energéticas, apostando por energías renovables como la solar, eólica y biomasa, las cuales reducen la dependencia de recursos finitos y contaminantes, y ofrecen una solución

viable y sostenible a largo plazo, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y garantizando la seguridad energética para las futuras generaciones [12].

Los países y las compañías a nivel global deben involucrarse de manera activa en actividades y proyectos que promuevan la conservación del medio ambiente y, por ende, el porvenir de las comunidades; por consiguiente, se están implementando prácticas más ecológicas y lucrativas [13] [14]. El proyecto cuenta con el objetivo de garantizar el acceso a energía a través de la diversificación de la matriz energética, a la vez, sea más sustentable [15].

La situación actual del suministro de gas en Colombia, marcada por decisiones de Ecopetrol y sequías, expone la vulnerabilidad de contratos de “firmeza condicionada” [16], evidenciando la necesidad de alternativas como el biogás. Este, generado de residuos orgánicos, reduce la dependencia del gas fósil, promueve la economía circular y fortalece el desarrollo rural en Mesitas del Colegio mediante empleo y negocios locales. A nivel internacional, la UE busca eliminar importaciones de combustible ruso para 2027, aunque en 2023 aún transitaban 13,7 cm por Ucrania [17], destacando la urgencia de soluciones autónomas.

La industria del gas frecuentemente menciona planes para reducir emisiones de metano, invertir en captura y almacenamiento de carbono (CCS), e implementar soluciones tecnológicas para reducir su huella de carbono. Las emisiones fugitivas de la producción de gas, que incluyen venteo, quema y fugas, son rutinariamente subestimadas [18].

El gas natural se ha convertido en una de las fuentes de energía más estratégicas, siendo parte de las energías para una transición energética. Según Enerdata, la producción mundial de gas natural se ha recuperado significativamente tras la pandemia de Covid-19, creciendo un 4% en 2021 (en comparación con 2020), y el consumo mundial creció un 4,6% en el mismo año. Su uso ha crecido de manera constante debido a sus ventajas ambientales frente

a otras fuentes de energía como el petróleo y el carbón y a que es un recurso que puede ser aprovechado desde el hogar hasta la industria [1]. En países como Argentina, México, Trinidad y Tobago y Venezuela es la fuente más importante de consumo de energía primaria. En Colombia, el gas natural se ha posicionado como un combustible estratégico a medida que crece la demanda. Considerando que Colombia cuenta con reservas probadas de gas natural de 6.1 años según el informe anual de reservas y recursos IRR 31 de diciembre del 2023 [19], es fundamental para la autosuficiencia del país incrementar las reservas de esta fuente energética y evitar aumentos en el precio del gas por las importaciones [20].

A nivel nacional, Naturgas advierte que entre 2025 y 2026 se requerirán fuentes externas para cubrir la demanda de gas, incrementando su costo [21]. La reducción de dependencia de hidroeléctricas ha impulsado alianzas entre universidades, entidades públicas y privadas para promover la digestión anaerobia. El proyecto de biogás en Mesitas del Colegio, respaldado por Unibagué y el Ministerio de Minas y Energía (ejemplo: SemAnaerobia), emerge como modelo de energía renovable, combinando sostenibilidad ambiental, innovación y fortalecimiento económico local [22].

El municipio de Mesitas del Colegio, ubicado en el departamento de Cundinamarca, enfrenta un desafío significativo en cuanto al acceso de vehículos pesados, lo que afecta directamente la provisión de servicios esenciales como el suministro de gas natural. Las vías de acceso al municipio son notoriamente angostas y con curvas pronunciadas, lo que hace que sea extremadamente difícil para los camiones que transportan este combustible llegar a sus destinos. Esta situación no solo pone en riesgo la seguridad de los conductores y los habitantes locales, sino que también limita la capacidad de los proveedores de gas natural para abastecer a la comunidad de manera eficiente [23].

Si bien se tiene servicio de gas natural en más del 95% de las viviendas del municipio, se identifica que poco más del 3% no cuenta con conexión a la red de gas, lo que puede afectar

negativamente la calidad de vida de 185 viviendas [4]. La carencia de gas natural en las zonas rurales obliga a los habitantes a recurrir a alternativas más costosas y menos eficientes [24], como lo es el gas propano y la quema de madera, lo que puede generar una carga económica adicional para las familias.

Es fundamental que se tomen medidas para abordar esta situación, realizando la inversión en infraestructura para conectar a más hogares al servicio de gas natural o teniendo fuentes alternativas para el suministro del servicio de gas. Al abordar este desafío, el municipio de Mesitas del Colegio puede mejorar la calidad de vida de sus residentes, fomentar el desarrollo económico y reducir los riesgos asociados con el transporte de combustibles.

Por lo tanto, surge la necesidad de presentar a la comunidad otras alternativas viables y sostenibles para satisfacer las necesidades energéticas de los habitantes de Mesitas del Colegio. Por otro lado, la gestión inadecuada de los residuos sólidos orgánicos conlleva impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública, muchos de estos son dejados en centros de acopio donde no cuentan con procesos de aprovechamiento, lo que genera enfermedades, proliferación de roedores, moscas y problemas sanitarios [25].

Los residuos pueden ser aprovechados para suplir necesidades energéticas, comunidades alejadas de los cascos urbanos como el municipio de Mesitas del Colegio que cuenta con una población de 22,335 habitantes (2020), y un sistema de gestión de residuos sólidos, producto de un Plan de Gestión Integral manejado por la empresa de Servicios Públicos de El Colegio – EMPUCO [26] [27]. Por ende, se plantea la posibilidad de aprovechar la biomasa residual del sector agrícola como fuente de energía renovable para la producción de biogás mediante un sistema de digestión anaerobia.

La disponibilidad de biomasa residual generada por los cultivos de banano en el municipio [28], alineados con el plan nacional de sustitución de leña y otros combustibles de uso ineficiente altamente contaminante para la cocción doméstica de alimentos presentado por

el ministerio de minas y energías evidencia la oportunidad para aprovechar los recursos a la mano para diversificar el consumo energético [29] [30]. Entre las rutas de conversión de biomasa se encuentran la termoquímica y la biológica. El aprovechamiento por gasificación, como tecnología termoquímica representa un reto debido a los porcentajes de humedad de los residuos, que requieren entre el 10 y 15% [31], opción compleja para materializarse en este proyecto. Así mismo, la combustión es usada principalmente en procesos de generación de energía térmica [32]. Por otra parte, en la conversión biológica se encuentra el proceso de digestión anaerobia, que requiere altos porcentajes de humedad en la biomasa, se recomienda ser mayor al 90%.

Se plantea que las alternativas propuestas en el estudio benefician a Mesitas del Colegio, y sirva como modelo replicable para otros municipios, que enfrentan desafíos similares en términos de acceso a energía sostenible y gestión de residuos, esto puede presentar un alivio económico frente al costo del gas natural y/o de la compra de pimpinas de gas. La implementación de esta iniciativa podría servir como un ejemplo inspirador para la adopción de prácticas más sostenibles en el ámbito local y regional, contribuyendo así a la construcción de un futuro más verde y resiliente para las comunidades en Colombia. Además, este estudio tendría un impacto directo en las comunidades dado que generar oportunidades económicas locales, a través de la creación de empleos relacionados con la recolección, clasificación y procesamiento de los residuos orgánicos, así como en la operación y mantenimiento de las instalaciones de digestión anaerobia. Así mismo, podría fomentar la colaboración entre el sector público, privado y la sociedad civil, fortaleciendo así el tejido social y promoviendo un desarrollo más equitativo y sostenible en la región.

CAPÍTULO 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Biomasa

La biomasa es una fuente de energía heterogénea ya que puede aparecer en diversas formas: residuos agrícolas (rastros), forestales (limpieza de montes y cuencas de ríos), agroalimentarios (residuos de la industria ganadera o aceite industrial) y la propia materia orgánica que generamos los seres humanos en forma de basura [33]. La biomasa se puede clasificar en las siguientes:

Biomasa natural: Esta es producida sin la intervención del ser humano y es generada naturalmente [34].

Biomasa residual: Esta se conforma residuos de la actividad del hombre. Ejemplo: residuos sólidos urbanos o los que proceden de las actividades agrícolas, ganaderas o industriales. Esta, a su vez, puede clasificarse en húmeda o seca [34].

Biomasa por cultivos energéticos: Estos son cultivos cuyo fin es el aprovechamiento energético y en los que se planta una especie concreta para maximizar la producción de materia viva [34].

Escalante Hernandez en sus estudios clasificaron los residuos orgánicos agrícolas como:

Cáscara y pulpa de frutas y vegetales: La cáscara y pulpa de frutas y vegetales son residuos ricos en materia orgánica y agua, lo que los convierte en un material sólido muy húmedo ideal para la biodigestión. Estos residuos aportan una variedad de nutrientes y compuestos que pueden ser descompuestos por microorganismos en un digestor anaeróbico, generando biogás compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono.

Cáscara y polvo de granos secos: La cáscara y polvo de granos secos son residuos secos que también pueden ser utilizados en la biodigestión. Aunque su contenido de humedad es menor en comparación con otros residuos, estos materiales aportan carbono y otros nutrientes valiosos para la producción de biogás.

Estiércol: El estiércol es un residuo pecuario sólido muy húmedo que contiene altas cantidades de materia orgánica y microorganismos beneficiosos para el proceso de biodigestión. Al ser un material rico en nitrógeno y otros nutrientes esenciales, el estiércol es una fuente importante de sustrato para la producción de biogás.

Tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura: Estos residuos agrícolas son una mezcla de materiales fibrosos y ricos en celulosa que pueden ser utilizados en la biodigestión. Aunque su descomposición puede ser más lenta debido a su composición fibrosa, estos residuos aportan una variedad de nutrientes y pueden ser una fuente adicional de materia prima para la producción de biogás.

4.1.2 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia también conocida como biometanización, es un proceso biológico con ausencia de oxígeno, en donde los residuos orgánicos se transforman, mediante la acción de los microorganismos, en biogás y los residuos más complejos de digerir conformaran el digestato [35]. El digestato es la materia generada por el proceso de digestión anaerobia, este compuesto por fibra y partículas grandes de los residuos orgánicos base también por fosforo, nitrógeno y potasio, los porcentajes de estos varían respecto a el residuo orgánico usado en el proceso de digestión [36] [37]. En la figura 1, se ilustra el diagrama de entrada y salida del proceso de digestión anaerobia. El biogás está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, y otros gases, en menor proporción como el vapor de agua, sulfuro de hidrógeno, etc [38]. El digestato es la materia generada por el proceso de digestión anaerobia.



Figura 1. Esquema general digestión anaerobia

Fuente: Autores

La digestión anaerobia, ocurre en cuatro etapas: i) hidrolítica, ii) ácido génica, iii) acetogénica y iv) metanogénica.

La primera etapa es la hidrolítica, en esta se da la descomposición de los compuestos orgánicos como lípidos, proteínas, hidratos de carbono y compuestos inorgánicos, estos son despolimerizados por enzimas hidrolíticas en moléculas solubles y fácilmente degradables como ácidos grasos, aminoácidos, monosacáridos y compuestos inorgánicos. Estas moléculas son más simples de solubilizar, los entes encargados de esto son las bacterias hidrolíticas-ácido génicas [38].

La siguiente etapa es la ácido génica, en esta los microorganismos y bacterias fermentativas por medio de la fermentación transforman los resultantes de hidrolítica en ácido acético (CH_3-COOH), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) en su mayoría, y una menor proporción en intermedios: alcoholes, ácidos grasos volátiles (otros ácidos grasos de cadena corta además del ácido acético) y ácidos orgánicos [38].

La tercera etapa es la acetogénica, los resultantes de la etapa ácido génica se transforman por las bacterias acetogénica en hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético, en su mayoría [38].

La metanogénica es a última etapa, en esta los microorganismos responsables de metanogénesis o formación de metano hacen presencia. Los dos principales microorganismos en esta etapa son los que degradaran el ácido acético produciendo metano y dióxido de carbono, y los que a partir del hidrógeno y dióxido de carbono resultantes de etapas anteriores van a generar metano y agua. La mayor productora de metano es por medio de la acetoclástica, la cual genera alrededor del 70% [38].

Bajo esta información se basa todo proyecto de generación de biogás. Todo esto ocurre dentro de un biodigestor, hay diferentes tipos y formas de digestores, esto varía dependiendo de la materia a usar y las necesidades del proyecto. Estos van desde una laguna cubierta hasta reactores con sistemas de calefacción, agitación del sustrato y almacenamiento del biogás producido.

4.1.3 Tipos de Biodigestores

Biodigestor domo fijo (chino). Como el nombre lo dice cuenta con una cámara de gas inmóvil y fija, el biogás generado se presuriza dentro del mismo. La presión interna del biodigestor genera un desnivel hidráulico entre el nivel interno y el nivel de la entrada y salida de este, esta diferencia de presión genera un movimiento de la biomasa dentro de este cuando el biogás es extraído [39].

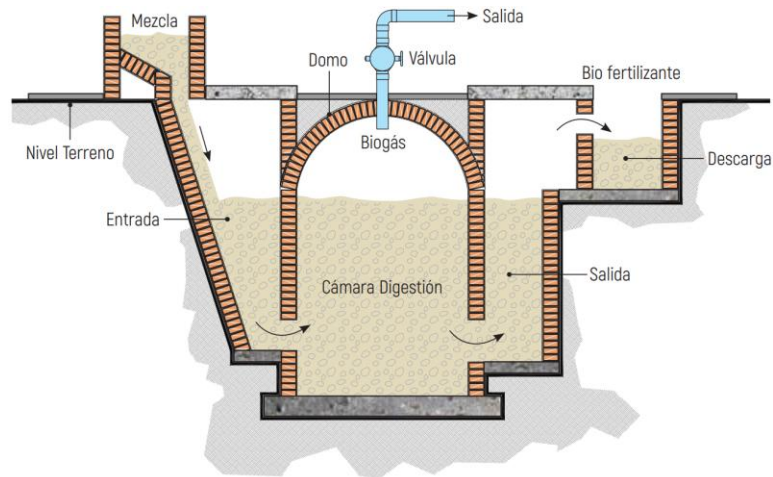


Figura 2. Biodigestor domo fijo.

Fuente: R. M. Leon Cifuentes [39].

Biodigestor domo móvil o flotante (hindú). Normalmente cuenta con una forma cilíndrica, donde la parte superior se puede desparar debido a la presión generada por el biogás, la parte superior que es móvil tiene forma de campana, la cual estas características le dan la cualidad de acumular el gas generado, esta campana tiende a ser metálica la cual eleva el costo de fabricación [39].

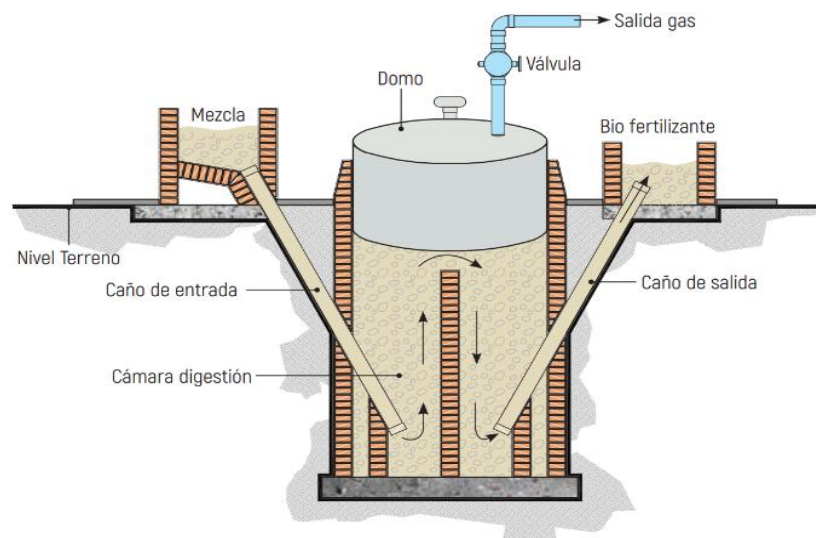


Figura 3. Biodigestor domo móvil.

Fuente: Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia [40].

Biodigestor tubular, laguna cubierta, Taiwán, CIPAV o biodigestores familiares de bajo costo. Es una bolsa cilíndrica plástica, al ser plástica es flexible permitiéndole inflarse y desinflarse con facilidad, entre los biodigestores es el más económico en fabricación, la ocupación de esta es 80% biomasa (Cámara de fermentación) y 20% biogás (campana). Este no conserva una presión constante y debe ser protegido por lo delicado de su material plástico [39].

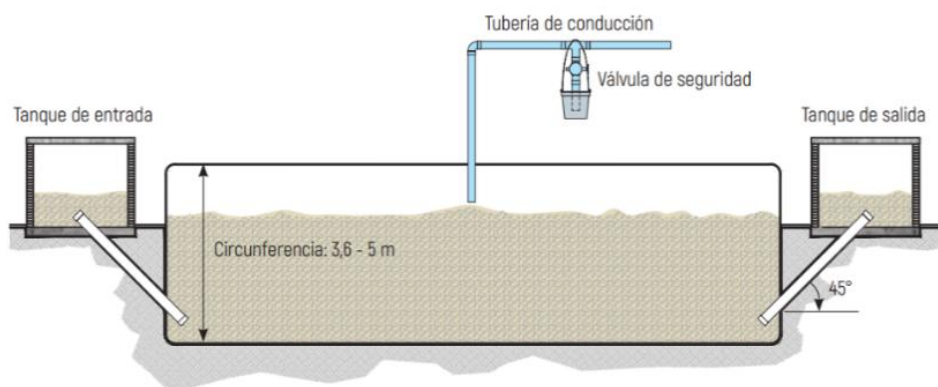


Figura 4. Biodigestor tubular.

Fuente: Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia [40].

En la tabla 1 se muestran las principales características de cada uno:

Características	Domo fijo	Domo Flotantes	Biodigestor tubular, laguna
Presión de gas	1,42 - 2,13 psi [41] [42]	N/A	3,72 - 4,65 psi varía respecto a la membrana usada [41] [42]
Medición de nivel de gas	Barómetro [42]	Barómetro y elevación de domo flotante [42]	Barómetro y elevación de membrana [42]
Vida útil.	20 años [43]	15 años [41]	30 años [43] [42] [44]
Mantenimiento	Baja. No hay partes móviles ni oxidables. [43] [42]	Altos requerimientos de mantención de la cúpula (remoción de óxido y pintado regular) [39] [43]	Baja. Revisión de filtraciones. [43]

Material de construcción.	Cemento, ferrocemento. Ladrillos [43]	Cemento, Ferrocemento, Ladrillo, acero [43]	Caucho, RMP, Polietileno, Geomembranas [43]
----------------------------------	---------------------------------------	---	---

Tabla 1. Características de biodigestores.

Fuente: Tomado de Leon Cifuentes, R.M adaptada por autores.

Uno de los puntos importantes es el costo de instalación y su fácil instalación, la facilidad de movilizar los materiales necesarios para su funcionamiento y su mantenimiento o reparaciones son puntos a favor, por esto los biodigestores tipo tubular son uno de los más usados.

Existen tres tipos de alimentación al sistema de digestión: i) Discontinuo, ii) semicontinuo, iii) Continuo.

Tipo discontinuo. Conocido comúnmente como alimentación batch. El proceso tiene un inicio y un fin, al inicio del proceso se carga toda la materia orgánica y al finalizar el proceso se descarga el efluente en totalidad. la generación de biogás varia a través del proceso, manejando picos y etapas de baja producción [45].

Tipo semicontinuo. Sus prolongados tiempos de funcionamiento permiten poca necesidad de manos humanas, esto disminuye los costos de funcionamiento en el proceso y cuentan con cargas de bastante volumen respecto a la dimensión del biodigestor. La biomasa usada en el biodigestor es agregada al igual que el proceso de retiro del efluente, las cargas son calculadas respecto al tiempo de retención hidráulica (TRH) y el volumen del digestor. Los tiempos de carga pueden ser de franjas de 1 a 15 días [46].

Tipo flujo continuo. Este tipo de alimentación se utiliza generalmente en reactores a gran escala, por ejemplo, industrialmente en tratamiento de aguas, estos sistemas requieren de grandes infraestructuras y una mayor mano de obra a comparación de otros. Su

alimentación es un proceso ininterrumpido, la materia orgánica que se carga es igual al que se descarga.

Tipos de alimentación	Tipo de materia orgánica	Tiempo de alimentación
Continuo	Aguas negras	Ininterrumpido
semicontinuo	Residuos agrícolas o residuos domésticos	1 a 15 días
Discontinuo	Biomasa de largos periodos de fermentación	15 a 45 días

Tabla 2. Características de tipos de alimentación.

Fuente: Manual de Biogás [47]

De estas se pueden manejar sistemas como domo fijo (chino), domo móvil o flotante (hindú) y tubular (Taiwán, CIPAV o biodigestores familiares de bajo costo). Cada uno de estos tienen sus características en duración, precio, complejidad, operación, etc [39], hay otros tipos de biodigestores como desplazamiento horizontal, tanques múltiples, etc, estos son usados para otros tipos de biomasa y tratamiento de aguas [45] [40].

4.1.4 Variables Clave

Los factores que pueden afectar o potenciar el funcionamiento de un biodigestor son muchos, estos se deben tener en cuenta en el diseño, ya que determinan el tiempo de retención, cantidad de biogás a generar y los costos que tendrá el proyecto. Algunos son los siguientes:

Temperatura: Las bacterias requieren ambientes con temperaturas controladas para su desarrollo, estos rangos de temperatura son: degradación psicrófilo es de inferiores a 30°, degradación mesófila es un rango de temperatura 33°C a 40°C y degradación termófila en un rango de 50°C a 60°C. La temperatura influye en la descomposición de la biomasa, entre sea mayor la temperatura la descomposición será más rápida [48].

PH: El crecimiento de los microorganismos durante la digestión es importante y el PH de un digestor puede promover el crecimiento de estos o afectarlos, el rango óptimo para el funcionamiento de un digestor es de 6.8 a 7.2, en rangos mayores o menores la eficiencia de generación de metano puede disminuir.

Pretratamiento: Los tratamientos previos pueden ayudar a la digestión de la biomasa en los biodigestores, permitiendo una fácil degradación y potenciando la generación de metano. Como la reducción de tamaño o molienda de la biomasa convierte un compuesto complejo en moléculas más simples que son utilizadas por los microorganismos anaeróbicos.

Tamaño de partícula: El tamaño de la partícula a digerir no debe ser muy grande, para evitar obstrucciones y evitar una lenta digestión. Al ser partículas pequeñas cuentan con mayor superficie que estará en contacto con los microorganismos, al ser partículas de gran tamaño la materia se solubiliza durante un largo periodo.

Agitación Se debe garantizar una mezcla uniforme del sustrato y los microorganismos, esto mejora la tasa de digestión y la estabilidad del proceso. Los sistemas de mezclado brindan los siguientes beneficios:

- Control de la producción de espuma de la metanogénesis
- Evita la sedimentación y la formación de espumas
- Mezcla los sustratos frescos con el inóculo (inoculo)
- Evita la formación de huecos que reducen el volumen efectivo del digestor
- Distribución uniforme de la densidad bacteriana
- Evita diferencias notorias de temperatura en el digestor

Inoculo: Se refiere al consorcio microbiano que se encarga de la degradación de la materia orgánica [49].

Lodos de siembra: Los lodos de siembra se usan en el proceso de digestión, estos son el consorcio microbiano que se encarga de la degradación del material orgánico en el proceso de digestión. Estos lodos pueden ser de otra planta de biogás en funcionamiento, una planta de tratamiento de agua residuales o purín de estiércol de vaca [47].

Tasa de carga orgánica: La generación de biogás depende de la carga orgánica y este determina el aporte de ácidos grasos volátiles. Al aumentar la carga también aumentan las bacterias ácido génicas y esto produce ácidos metanógenos, este es un factor que se debe controlar con la carga orgánica [47].

4.1.5 Estudio de Factibilidad

Es un análisis que se realiza para evaluar la viabilidad de un proyecto antes de su ejecución. Este tipo de estudio tiene como objetivo principal determinar si el proyecto es viable desde diferentes perspectivas (técnica, económica, legal, operativa y de tiempo), y si los beneficios esperados justifican los recursos que se van a invertir. Para el análisis de este proyecto, se tuvo en cuenta dos puntos clave: la factibilidad técnica y la factibilidad económica.

Se resalta la importancia de los estudios de factibilidad económica debido a que, en este contexto, se ha implementado estudios de factibilidad de costos energéticos como el implementado en el Colegio Compartir en la ciudad de Cali [50] en donde se manejaron términos similares que son de utilidad para la realización de este proyecto y los cuales explicaremos un poco a continuación:

La factibilidad técnica examina si los recursos humanos, tecnológicos y las capacidades técnicas están disponibles y son adecuados para la realización del proyecto, entre estos recursos se examina la disponibilidad de personal calificado que tenga la experiencia y las habilidades técnicas necesarias para la ejecución del proyecto. Así mismo se examina la disponibilidad de la infraestructura necesaria, como instalaciones físicas, equipos,

software, y sistemas. También se considera si la tecnología actual es capaz de soportar las exigencias del proyecto o si se requieren nuevas tecnologías que no han sido probadas [51].

En la factibilidad económica se determina si el proyecto es rentable y sostenible a largo plazo, lo que implica un análisis de los costos y beneficios asociados con el proyecto. Algunas variables clave son:

- **Estimación de Costos y Gastos:** Se realiza un desglose detallado de todos los costos y gastos asociados con el presupuesto requerido para la ejecución del proyecto, incluidos los costos de la inversión inicial, los costos operativos recurrentes, costos de mantenimiento, y cualquier otro gasto previsto [51] [52].
- **Proyección de Ingresos:** Se proyectan los ingresos que se espera generar a partir del proyecto, tomando en cuenta factores como la demanda del mercado, precios, y condiciones económicas generales [51] [52].
- **Análisis de Flujo de Caja:** Este análisis asegura que el proyecto tendrá suficiente liquidez para cubrir sus gastos a medida que avanza, evitando problemas financieros que puedan comprometer su viabilidad, teniendo en cuenta los ingresos proyectados, gastos proyectados (sin tener en cuenta depreciaciones y amortiguaciones, las necesidades operativas de financiación y necesidades de inversión) [51] [52].
- **VPN (Valor Presente Neto):** Es la diferencia entre el valor presente de los flujos de caja futuros generados por el proyecto y la inversión inicial. Un VPN positivo indica que el proyecto generará valor y es financieramente viable, mientras que un VPN negativo sugiere que el proyecto no cubrirá los costos de capital y, por lo tanto, no es rentable [51] [52].

- **TIR (Tasa Interna de Retorno):** Es la tasa de rendimiento esperada del proyecto. Un proyecto es considerado atractivo si su TIR es mayor que el costo del capital o la tasa mínima de rendimiento que espera el inversionista [51] [52].
- **Análisis del Retorno de la Inversión (ROI):** El ROI es una métrica clave que compara los beneficios esperados con la inversión inicial. Un ROI positivo indica que el proyecto es financieramente viable [51] [52].
- **Tiempo de Recuperación:** Es el período que toma recuperar la inversión inicial del proyecto a partir de los flujos de caja generados. Indica cuánto tiempo tardará el proyecto en recuperar su inversión [51] [52].
- **Evaluación de Riesgos Financieros:** Se identifican y evalúan los posibles riesgos financieros que puedan afectar la viabilidad del proyecto, como fluctuaciones en el mercado, cambios en las tasas de interés, o riesgos cambiarios [51] [52].

4.2 ESTADO DEL ARTE

Para ello, se revisan investigaciones, proyectos y pruebas piloto, en donde se observa el aprovechamiento de biomasa para la generación de biogás. Se destacan casos de estudio de clasificación de biomasas, capacidad de generación de diferentes biomasas, modelos de generación, optimización de plantas existentes y gestión de residuos orgánicos.

Los componentes que conforman el biogás varían debido a la biomasa que se usa en el proceso anaeróbico. En este sentido, la planta de biogás de Herning en Dinamarca utiliza residuos orgánicos de la agricultura y la industria alimentaria para generar biogás y producir electricidad y calor para uso doméstico e industrial. Este estudio determinó que la producción de metano en el estiércol del cerdo y el estiércol del ganado lechero genera entre $282\text{-}301\text{ m}^3\text{ CH}_4\text{LU}^{-1}$ (LU =unidades de ganado) [53].

El estudio realizado por Maria E. Gonzáles y Sergio Pérez Fabiel revisaron el potencial de generación de metano mediante la digestión anaerobia, este estudio fue realizado por medio de la prueba espirométrica biochemical methane potential (BMP). En el estudio se usó residuos de banano y lodo residual proveniente de un proceso previo de estabilización de dos meses bajo condiciones anaeróbicas de metanización de residuos de banano. Los cilindros usados para el almacenamiento de la prueba se mantuvieron en una temperatura estable entre $35\pm 1^{\circ}\text{C}$, con una agitación o mezcla constante a 120 rpm, durante 63 días [54] [55] [56]. El metano generado por la biomasa es medido para determinar su potencial, este es generado por la masa sólida volátil (SV) o la demanda química de oxígeno (DQO), estos también se pueden expresar en términos de biodegradabilidad dividiendo el volumen de metano acumulado por el volumen de metano acumulado teórico y la relación química es $1 \text{ g DQO} = 0.35 \text{ ml de CH}_4$ en condiciones estándar de temperatura y presión, lo que genero estimar el porcentaje de biogás y su confirmación [57] [56]. Este estudio nos permite comprender cual es el componente en la materia orgánica con potencial de generación de biogás y su porcentaje de representación sobre masa.

Del mismo modo en España la Escuela técnica superior de ingeniería industrial en Badajoz realizo una evaluación de producción y calidad de biogás, de cuatro materias orgánicas diferentes, las cuales fueron microalgas (MB), sorgo (S), rastrojo de maíz (CS) y aceite de colza (RO). Para el proceso de digestión ADM1 de la Asociación Internacional del Agua (IWA) Los procesos de digestión se realizaron en dos reactores discontinuos y contaba con agitación mecánica. En este estudio se obtuvieron rendimientos de metano de 306, 345, 419 y 740 NL kg (rendimiento de metano = NL kgVS^{-1} , sustrato=NL), para MB, CS, S Y RO [58].

Por otra parte, Natalia Herrero y colegas en la Universidad de Verona, revisa el rendimiento de generación de biogás de diferentes biomásas generadas en el sector agroindustrial y alimenticio. Este estudio agrupa las biomásas según sus características químicas o su aplicación en grandes categorías: cultivos energéticos, subproductos lignocelulósicos,

subproductos herbáceos, subproductos vegetales, subproductos frutícolas, efluentes pecuarios y varios, de todas las biomásas resaltaron salsa de ragu y pesto y los subproductos lácteos, siendo estos los que superan en más de 700 *litros de CH₄ por kg / sólidos volátiles* [59].

Así mismo, Olatunde Dahunsi, Oranusi y Enontiemoria en Nigeria realizaron la evaluación del potencial de la cascara de papaya para producción de biogás. Este estudio parte de dos puntos: la materia prima sin tratar y con mezcla mecánica como tratamiento previo, para lograr una comparación de la producción de biogás. Los experimentos obtuvieron un rendimiento de 0.1839m³/kg, materia pretratada y 0.1361 m³/kg materia sin tratar, obteniendo mejores rendimientos en los de pretratamiento mecánico y termo alcalino [60].

Es importante tener en cuenta los factores climáticos que puede afectar el proceso de digestión anaerobia, así como Thibault Perrigault y colegas de Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE) desarrollaron un modelo térmico simple dependiente del tiempo utilizando entradas de radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente y geometría del digestor. Las salidas del modelo incluyen temperaturas del lodo, el biogás, su membrana de retención y el aire, la pared y la cubierta del invernadero. Para dar solución de a las bajas temperaturas de operación de digestores que se encuentran en climas fríos se recomienda el uso de invernaderos con paredes de adobe macizo y un aislamiento de paja en la zanja [61], esta sería una solución que se ajusta a la idea de digestores de bajo costo. Esto nos permite darnos cuenta la importancia de usos de cubiertas en forma de invernaderos para una buena operación de digestores de membrana.

También se analizan proyectos y experiencias nacionales relevantes en Colombia relacionados con el aprovechamiento de residuos sólidos y la generación de biogás. Se examinan casos de éxito en municipios o regiones que han implementado sistemas de biodigestión para la producción de biogás a partir de residuos sólidos.

Un ejemplo de estudios hechos en Colombia sobre los avances que ha tenido la digestión anaeróbica es el realizado por C. Tavera-Ruiz y compañeros, ellos encontraron que la biomasa más usada en Colombia para la producción de gas es el estiércol de diversas explotaciones ganaderas, seguido por desechos orgánicos de otras fuentes no especificadas. También encontraron que de 996 sistemas de generación de biogás revisados el 76% de estos usaban digestores tubulares de bajo costo. También nombran varios sistemas implementados a nivel nacional y brindan la información de los sustratos usados, año de operación y potencial de producción de metano de estos [62].

Por último, en el estudio realizado por C. Grandas Tavera y T. Raab al., analizan la forma de valorización de digestores en Colombia, para dar a entender la viabilidad económica y la sostenibilidad del biogás, en donde toma como base la central eléctrica GICON, ubicada en Colombia. GICON usa los residuos de fruta y verduras de los mercados de Cali. Los resultados dieron que surgieron ganancias al tratar el digestato por medio de tecnología de evaporación al vacío. La venta del digestato tratado a través de la tecnología de evaporación al vacío, representan una ganancia [63]. La evaporación al vacío se concentró el 27% de nitrógeno, el 18% de fósforo y el 33% de potasio de la materia prima. Además, redujo el volumen de agua, facilitando el transporte del producto y haciéndolo comercialmente atractivo. Esta alternativa presentó los mayores ingresos para el proyecto y sus gastos fueron ligeramente superiores a los calculados para el digestato crudo y separado [63].

La realización de este trabajo nos permite conocer el impacto económico y suministro de servicio de gas a comunidades que sufren de falencias en la prestación de este servicio. Las comunidades que cuentan con recursos de biomasa por actividades agrícolas cuentan con una oportunidad de solventar necesidades de gas y energía haciendo un aprovechamiento de estos recursos. Los estudios revisados solo tienen en cuenta la solución a pequeña escala, dando solución de suministro de gas por medio de digestores familiares para una vivienda, dejando de lado la opción de una solución general para una comunidad

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, debido a que cada etapa del análisis requiere la recolección y el análisis de datos numéricos relacionados con la disponibilidad y las características físicas y químicas de los residuos orgánicos a investigar. Además, se busca determinar el potencial de generación de biogás mediante cálculos matemáticos. El estudio incluye el dimensionamiento del sistema de digestión anaerobia y evalúa la viabilidad económica del sistema utilizando indicadores financieros cuantitativos. El proyecto se desarrolló en cuatro fases en línea con los objetivos planteados, en la figura 5 se puede observar el diagrama metodológico.

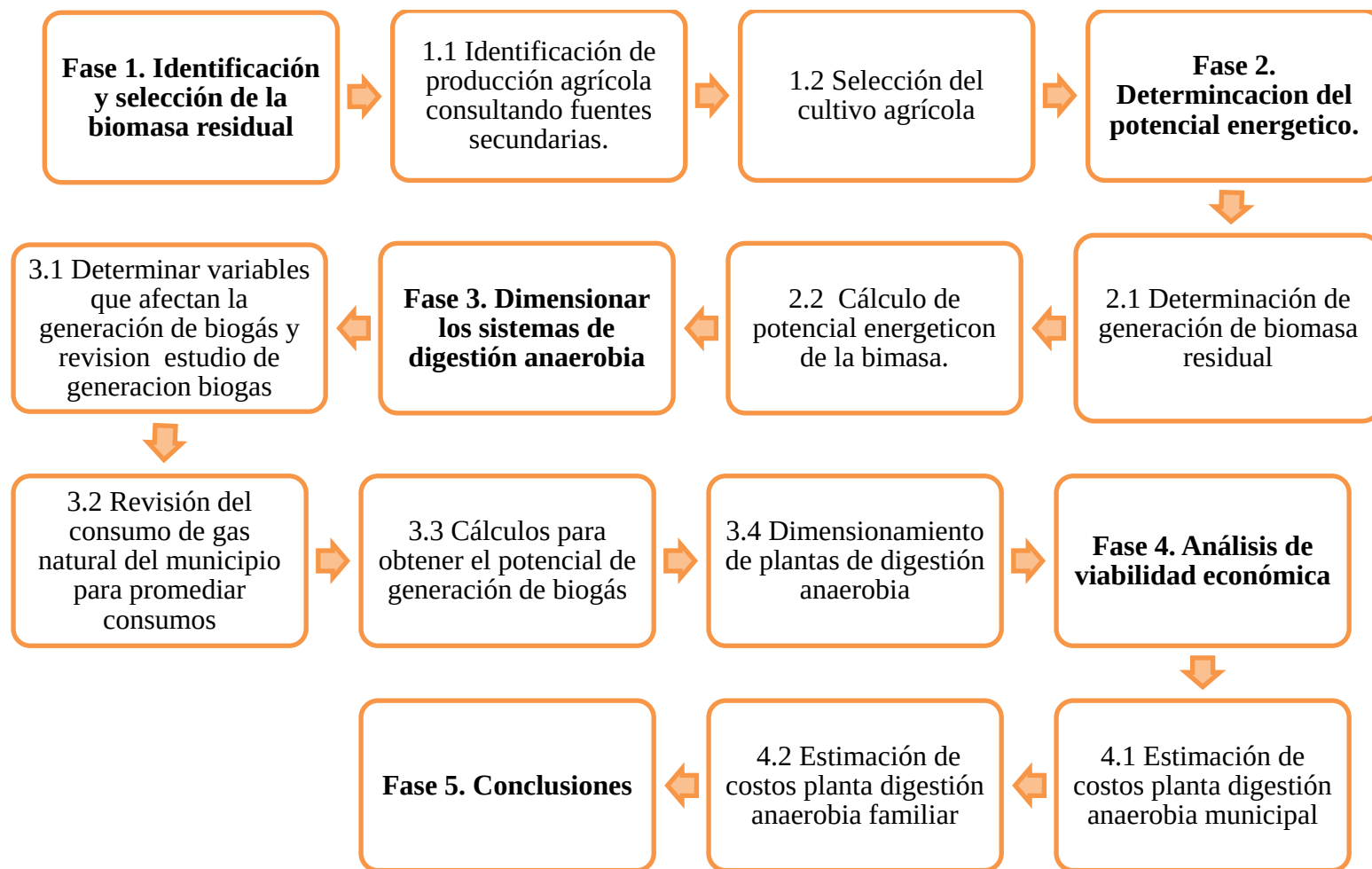


Figura 5. Metodología

Fuente: Autores

Fase 1. Identificación y selección de la biomasa residual.

1.1 Identificación de producción agrícola consultando fuentes secundarias: Se realizó la identificación de los productos de mayor producción en el sector agrícola generados en el municipio de Mesitas del Colegio. Esto se llevó a cabo a través de la consulta en bases de datos nacionales como la base de datos Evaluaciones Agropecuarias Municipales – EVA publicadas por la Unidad De Planeación Rural Agropecuaria de Colombia - UPRA [28] para determinar la producción agrícola en este municipio.

1.2 Selección del cultivo agrícola: De acuerdo con la base de datos se seleccionó el cultivo que genera la mayor cantidad de residuos aprovechables como primer criterio, para el segundo criterio se utilizó el atlas de biomasa para identificar el tipo de residuo y el factor de residuo, con esto se determinó la generación de biomasa residual del o los cultivos.

Fase 2. Determinación del potencial energético

2.1 Determinación de generación de biomasa residual: En esta fase el potencial energético se determinó utilizando las características físicas y químicas de cada uno de los residuos evaluados a través del análisis del atlas de biomasa de la UPME y el artículo de Juan Manuel Mondragon [64].

2.2 Cálculo de potencial energético utilizando propiedades fisicoquímicas: Para hallar el potencial energético se tiene que encontrar la relación entre la masa de residuo seco (MRS) y la energía del residuo por unidad de masa o Poder Calorífico Inferior (PCI). Se utiliza la ecuación general para el cálculo del potencial energético de la biomasa. Se usan las ecuaciones (1) y (2).

$$PE = (MRS) * PCI \quad (1)$$

PE =Potencial energético [MJ (Mega julios) o MWh (Megavatios-hora)]

MRS = Masa de residuo seco [t (toneladas) o kg (kilogramos)]

PCI = Potencial calorífico inferior [MJ/kg (Megajulios por kilogramo) o en kcal/kg (kilocalorías por kilogramo)]

$$Kj/Kg = Kcal/kg \times 4,184 \quad (2)$$

Fase 3 Dimensionamiento de sistema de digestión anaerobia

3.1 Revisión de variables y estudios en la generación de biogás: Se indagaron las principales variables que afectan los cálculos para la generación de biogás del municipio de El Colegio, como son cantidad de biomasa disponible en un año, clima, temperatura, tiempo de degradación de la materia, entre otros. También se revisó y explico estudios donde se calcula el porcentaje de generación de biogás respecto a la materia orgánica usada.

3.2 Revisión del consumo de gas natural del municipio: Se buscó por medio de entes públicos y empresas privadas al consumo de gas natural del municipio, la cantidad de viviendas conectadas al servicio de gas natural y viviendas que no cuentan con el servicio, para obtener un promedio de consumo de la región.

3.3 Potencial de generación de biogás: Se realizo el cálculo de potencial de biogás en los dos escenarios de acuerdo con la escala (familiar y municipal), teniendo en cuenta la materia orgánica disponible en los dos escenarios. Esto se logró tomando de base los estudios revisados y así conocer qué número de usuarios se pueden proveer con biogás y metano.

3.4 Dimensionamiento de plantas de digestión anaerobia: Una vez obtenidas las variables necesarias se realiza el dimensionamiento del digestor municipal y familiar, teniendo en cuenta la materia orgánica disponible en cada escenario. El dimensionamiento municipal

cuenta con las etapas de tratamiento de biogás, almacenamiento, sistema de quemado de emergencia, sistema de compresión, zona de recibo y despacho de la planta.

Para llevar a cabo el dimensionamiento municipal y familiar se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$[65] \quad \text{oDM} = \text{oDM}\% * \text{TS}\% * \text{Generación}_{\text{Biomasa}} \quad (3)$$

$\text{oDM} = \text{Materia orgánica seca} \left(\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right).$

$\text{oDM}\% = \text{Materia orgánica seca} (\%)$

$\text{TS}\% = \text{Sólidos totales en la materia} (\%)$

$\text{Generación}_{\text{Biomasa}} = \text{Toneladas de materia orgánica (ton/ año)}.$

$$[65] \quad \text{Prod CH}_4 = \text{Gas CH}_{4\text{Biomasa}} * \text{oDM} * \frac{1000\text{kg}}{1 \text{ ton}} \quad (4)$$

$\text{Prod CH}_4 = \text{Volumen de metano} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right)$

$\text{Gas CH}_{4\text{Biomasa}} = \text{Metano generado por materia seca} \left(\frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{kg oDM}} \right).$

$\text{oDM} = \text{Materia seca orgánica} \left(\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right).$

$$[65] \quad \text{Biogás}_T = \frac{\text{Prod CH}_4}{\% \text{CH}_{4\text{Biogás}}} \quad (5)$$

$\text{Biogás}_T = \text{Biogás generado por la materia orgánica} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right)$

$\% \text{CH}_{4\text{Biogás}} = \text{Porcentaje de metano en el biogás}$

$$[66] \quad V_L = (V_{\text{Biomasa}} + V_{\text{Agua}})T_r \quad (6)$$

$V_{\text{Biomasa}} = \text{Volumen de la materia orgánica diaria (m}^3\text{)}$

$V_{\text{Agua}} = \text{Litros de agua (m}^3\text{)}$

T_r = Tiempo de retención (días)

$$[66] \quad V_G = \frac{V_L}{0,75} \quad (7)$$

V_G = Volumen gaseoso (m^3).

$$[66] \quad V_T = V_G + V_L \quad (8)$$

V_T = Volumen total del digestor (m^3)

$$[67] \quad L_D = \frac{V_L}{\frac{A_M + A_m}{2} * Altura} \quad (9)$$

L_D = Longitud del digestor (m)

Altura = Cuenta de la zanja (m)

A_M = Ancho mayor (m)

A_m = Ancho menor (m)

Fase 4 Análisis de viabilidad económica.

4.1 Estimación de costos de planta de digestión anaerobia municipal

Se realizó la estimación económica del desarrollo de un proyecto de generación de biogás de un digestor municipal donde se aproveche los todos los residuos del banano generados en el municipio para suministrar gas a las viviendas que no cuentan con este servicio, se tuvo en cuenta los costos de adecuación, instalación, puesta en marcha y funcionamiento por 30 años, este biodigestor tiene un nombre de biodigestor Municipal.

Para determinar los flujos de caja se utilizó la siguiente ecuación:

$$FN = I - C \text{ [COP]} \quad (11)$$

FN= Flujo neto

I= Ingresos

C= Costos

Para determinar el Valor Presente Neto (VPN) se utilizó la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{l} [51] \\ [52] \end{array} \quad VPN = \sum \left(\frac{FCn}{(1+r)^n} \right) - I \quad (11)$$

VPN = Valor Presente Neto [COP]

r = Tasa de descuento (10%)

FC = Flujo de caja

n = Numero de periodos (30 años)

I = Inversión inicial [COP]

Para determinar la Tasa de Retorno Interna (TIR) se utilizó la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{l} [51] \\ [52] \end{array} \quad 0 = \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+r)^t} - I \quad (12)$$

TIR = Tasa de Retorno Interna [COP]

FCt = Flujo de caja en el período t. Igual que en la ecuación del VPN. [COP]

r = Tasa de retorno interna, que se está buscando. Es la tasa de descuento que iguala el VPN a cero.

t = Período (30 años).

n = Número total de períodos (30 años).

I = Inversión inicial. [COP]

4.2 Estimación de costos planta de digestión anaerobia familiar: Se realizó la estimación económica del desarrollo de un proyecto de generación de biogás de un digestor familiar en donde se aproveche todos los residuos del banano generados en la finca productora para suministrar gas de autoconsumo, se tuvo en cuenta los costos de adecuación, instalación, puesta en marcha y funcionamiento por 30 años. Se realizó indagaciones con diferentes tipos de empresas que prestan este servicio de instalación y mantenimiento de biodigestores.

Ecuación adicional diferente de las aplicadas en las fases anteriores:

$$\textit{Periodo de recuperaci3n} = \frac{\textit{Inversi3n inicial}}{\textit{flujo de caja neto}} \quad (13)$$

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 SELECCIÓN DE BIOMASA RESIDUAL.

A nivel nacional se tiene gran variedad de residuos de acuerdo con el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) [68], se clasifican en 3 sectores principales el agrícola, el sector pecuario y el sector de residuos sólidos orgánicos urbanos, esta investigación aborda la problemática de la disposición final de los residuos orgánicos que pueden ser aprovechados desde su separación en la fuente. Uno de los pasos más importantes es la selección de residuo a aprovechar, se descartó el sector de residuos sólidos orgánicos urbanos puesto que el municipio no tiene una estación de transferencia o centros de almacenamientos temporales en donde se pueda llevar a cabo la separación de los residuos aprovechables y no aprovechables, lo que conduce a determinar la viabilidad en el sector agrícola.

En la tabla 3, se muestra la principal producción agrícola del municipio, así como el área sembrada y cosechada de cada uno de los cultivos. Se reporta la mayor producción de mango, mandarina, banano, naranja, plátano y mora. (UPRA) en el año 2022 [47].

Cultivo	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Producción (t)
Mango	987	982	8.838
Mandarina	106	106	2.014
Banano	359	359	1.795
Naranja	110,5	110,5	1.657,5
Plátano	271	271	1.219,5
Mora	271,6	271,6	1.086,4

Tabla 3. Producción agrícola de Mesitas del colegio en 2022

Fuente: Unidad De Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) adaptada por autores

El estudio contempla específicamente el cultivo del banano debido a que el mango, aunque se produce en más volumen que el banano, los residuos aprovechables que este genera son entre el 35-55% de subproducto (semilla y cáscara) que se obtiene al consumo final lo que

genera que su recolección sea muy difícil [69], caso similar a la mora y la mandarina en donde se aprovecha en su totalidad el fruto y no se tienen residuos aprovechables en post cosecha que se pueda aprovechar para la producción de biogás.

El banano es una fruta tropical que constituye un cultivo líder en la producción y comercio agrícola a nivel mundial. En el municipio de Mesitas Del Colegio se genera 1795 toneladas de banano anuales según las cifras arrojadas por la Unidad De Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) en el año 2022 [28].

Del cultivo del banano se genera la siguiente biomasa residual:

Raquis: El raquis del banano se refiere al tallo central o eje de la inflorescencia de la planta del banano (*Musa spp.*). Esta parte de la planta sostiene las manos de banano, que son racimos de frutas.

Vástago. Es el tallo principal de la planta del banano. Este tallo es la parte que emerge del suelo y que sostiene el crecimiento de la planta y sus estructuras, como las hojas y los racimos de frutas.



Figura 6. Vástago

Fuente: tomada de Pixabay

Rechazo: Cuando el producto es rechazado o no cumple con los estándares de calidad requeridos para su comercialización y venta.

Con estos resultados determinamos que el residuo seleccionado (el banano) cumple con las características que se necesitan para este proyecto, es uno de los producidos en la región, además es uno de los que más genera residuos aprovechables para la biodigestión.

6.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO.

Para determinar el potencial energético la cual es la cantidad energía que puede generar el residuo seleccionado, se indagó la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, y la demanda energética a la que se pretende satisfacer con el biogás generado.



Figura 7. Rechazo del banano

Fuente: OpenAI. (2025) Bing Creator

Una de las propiedades más significativas de los combustibles es su capacidad energética, la cual se puede derivar de su conversión y aplicación. Este atributo es esencial para identificar el tipo de biomasa adecuada para su uso como combustible. La reacción química exotérmica que implica la oxidación de materiales con carbono e hidrógeno para producir dióxido de carbono y agua se conoce como proceso de combustión. El Poder Calorífico Inferior (PCI) es el parámetro que permite medir la energía liberada durante los procesos de combustión de los materiales, sin considerar el calor de condensación del vapor de agua

generado [68]. En la tabla 4 se muestran las propiedades físicas y químicas de los residuos del cultivo de banano.

Para el rechazo del plátano no se observa estudios que aporten cifras, sin embargo, para este resultado se tomara el PCI de rechazo del banano como punto de referencia debido a su similitud en sus características.

La biomasa agrícola residual en Colombia exhibe una diversidad de niveles de humedad. Por ejemplo, los residuos de capacho de maíz, cascarilla de arroz y hojas secas de la caña panelera presentan una humedad aproximada del 7,55% y pueden ser utilizados energéticamente a través de métodos termoquímicos. Por otro lado, los desechos de plátano y banano, con un contenido de humedad cercano al 94%, son adecuados para procesos de conversión bioquímica [68].

La masa del residuo seco es importante para poder hallar el potencial energético, por lo que se ve en la necesidad de hallar la humedad de los residuos generados por las toneladas de banano y plátano. El porcentaje de humedad en los residuos del banano varía según la parte de la planta de la que se trate:

Los factores que influyen en la humedad son tres, la madurez del banano el cual son los residuos de banano maduros que tendrán un mayor contenido de humedad que los de banano verdes, el segundo factor son las condiciones climáticas: el cual determina la humedad ambiental y la temperatura afectarán el contenido de humedad de los residuos. Por último, tenemos el método de procesamiento utilizado para procesar los residuos, como el secado o el ensilaje, afectará su contenido de humedad. [64]

Con base en estas dos fuentes de información (Atlas de la UPME y artículo científico de Caracterización fisicoquímica de los subproductos cáscara y vástago del banano). En la tabla 4 se identifica las propiedades físicas y químicas de los residuos del cultivo de banano

Producto	Producción Anual (t)	Tipo de Residuo	Factor de Residuo UPME t Residuos / t Producto Principal	Porcentaje de Humedad	Cantidad de Residuos (t/año)	MRS (Kg/año)	PCI (kJ/kg)	Potencial Energético (MJ/año)
Banano	1795	Raquis de banano	1	77%	1.795	412,85	7,56	3.124.862
		Vástago de banano	5	95%	8.975	448,75	8,50	3.815.273
		Banano de rechazo	0,15	92%	269,25	21,54	10,41	224.231

Tabla 4. Masa de residuos del banano de municipio Mesitas del Colegio, propiedades físicas y químicas de los residuos del cultivo de banano.

*MRS=masa de residuo seco
PCI=Poder Calorífico Inferior*

Fuente: Atlas de la UPME adaptado por autores [68] [64]

Según estos resultados los residuos de la producción de banano, principalmente el raquis y el vástago, representan una cantidad significativa de subproductos con un alto potencial energético. El aprovechamiento de estos residuos a través de la producción de bioenergía, biocombustibles, compost u otros productos puede contribuir a una gestión más sostenible de los recursos agrícolas y a la generación de energía renovable. El potencial energético total de los residuos del cultivo de banano de Mesitas del Colegio asciende a 7.164.366 MJ/año. Esto representa una cantidad considerable de energía que podría ser aprovechada, particularmente en proyectos de bioenergía, lo que contribuiría a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Actualmente estos residuos se utilizan de forma tradicional, a través de compostaje el cual se descompone de manera controlada produciendo un fertilizante natural que mejora la calidad del suelo sin necesidad de usar fertilizantes químicos. Sin embargo, la implementación de estas soluciones requiere una evaluación de los aspectos logísticos, económicos, técnicos y ambientales que se irán considerando a lo largo de este documento.

6.3 DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Se realizó el dimensionamiento de dos sistemas de digestión anaeróbica, que brindan solución a la problemática de abastecimiento de gas del municipio Mesitas de El Colegio. El primero es un biodigestor a Municipal, el cual se alimentará con la recolección de los residuos del banano generados en todo el municipio para la producción y venta de biogás y digestato como enmienda de suelos. El segundo, es un biodigestor familiar, que aprovechara los residuos de raquis de banano generados en fincas de 5 ha productoras de banano, para autoabastecerse de biogás y la producción y venta de digestato. A continuación, se muestra el dimensionamiento de las plantas de digestión anaerobia para los escenarios mencionados a partir del potencial de generación metano.

Al dimensionar un biodigestor es necesario conocer el consumo de gas de la población a la que se quiere beneficiar. Según la información de la empresa Vanti S.A.E.S.P. publicado en la página web del Ministerio de minas y energía y en la página web de Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios SUI, el número de usuarios en el municipio El Colegio es de 4472 usuarios, los cuales solo 4287 usuarios residenciales se encuentran conectados al sistema de gas del municipio, teniendo una cobertura del 95.86 % del municipio y teniendo a 185 usuarios sin servicio [4] [5]. La empresa Vanti S.A ESP en el año 2022 reporto un consumo total residencial de gas natural entre zonas rurales y urbanas, de 453912 m^3 , dando un consumo promedio anual por usuarios de 105.88 m^3 en el municipio de El Colegio año 2022 [4] [5].

Para el cálculo del potencial de producción de metano a partir de residuos de banano se tuvo en cuenta los estudios de Kerubo Damaris [65], sobre la digestión anaeróbica del banano, calcula la producción de metano en diferentes partes de la planta, lo cual permite conocer que parte de la planta del banano es más eficiente para la generación de biogás por la cantidad de metano que la planta produce en su proceso de descomposición anaeróbica.

Para el desarrollo de este, se utilizó lodo digerido sin tratar de una planta de tratamiento de aguas residuales a una temperatura de 37°C, durante 51 días en lotes de tres. Una vez finalizado el periodo, se realizó un estudio de cromatografía para conocer la calidad del Biogás, analizando: el porcentaje que representa los sólidos totales (TS), la materia seca orgánica (oDM), la generación de metano ($\text{Gas CH}_4_{\text{Biomasa}}$) y el porcentaje del metano en el biogás generado. En la tabla 6 se puede identificar los valores que usaron para el cálculo de la cantidad de biogás total (Biogas) producido en cada uno de los dos escenarios propuestos, usando Ecuación (3), (4) y (5) [65]; cálculos que se realizaron para cada una de las 3 biomasa usadas (raquis de banano, vástago de banano y rechazo de banano), la disposición de materia orgánica es la variable que cambia en estos dos escenarios.

Para el cálculo del biodigestor familiar, se tuvo en cuenta los residuos de cosecha de banano de una finca promedio, pero se seleccionó solo uno de los tres residuos para su aprovechamiento, para esto se analizó la producción de residuos de plantaciones de banano en las fincas del departamento de Cundinamarca, las cuales tienen un promedio de área cultivada de 5 hectáreas, su potencial de generación de biogás y la necesidad de gas que requiere en promedio un usuario [70]. Conociendo las toneladas de residuo (*tabla 4*) y el área cultivada de banano (359 hectáreas *tabla 3*) en el municipio de Mesitas del Colegio en Cundinamarca, se procede a calcular la media de producción de residuo por hectárea mostradas en la *tabla 5*.

Materia	Residuos generados en t/(ha*año)	Residuos generados en fincas de 5 ha (t/ año)	Potencial de generación de biogás por tonelada. (m^3/t)
Raquis de banano	5	25	41,49
Vástago de banano	25	125	8,69
Banano de rechazo	0,75	3,75	6,07

Tabla 5. Potencial de generación de residuo de biogás de fincas de 5 ha
Fuente: Tomado del ministerio de agricultura adaptado por autores [70].

Conociendo la cantidad de materia con la que se cuenta en una finca productora y el municipio, se procede a calcular la cantidad de metano y biogás capaz de producir cada uno de los escenarios aplicando las Ecuaciones (3), (4) y (5), en ese mismo orden.

Sustrato	oDM (%)	TS (%)	Humedad (%)	$CH_4_{Biomasa}$ $\left(\frac{m^3 CH_4}{kg \text{ oDM}}\right)$	$\% CH_4_{Biogás}$	Capacidad municipal anual		Capacidad anual fincas 5 ha	
						Metano (m^3)	Biogás (m^3)	Metano (m^3)	Biogás (m^3)
Raquis del banano	93.48%	23,08%	76.92%	0,125	65%	48.409,31	74.475,88	674,21	1.037,26
Vástago del banano	89.61%	5,00%	95.00%	0,132	68%	53.080,48	78.059,53	739,28	1.087,18
Rechazo de banano	85.71%	7,89%	92.11%	0,062	69%	1.128,9	.1636,09	15,71	22,78

$$\text{Gas } CH_4_{Biomasa} \left(\frac{m^3 CH_4}{kg \text{ oDM}} \right) = \text{Generación de metano por materia seca orgánica}$$

$$\% CH_4_{Biogás} = \text{Porcentaje de metano en el biogás.}$$

Tabla 6. Porcentaje de materia seca orgánica de cada sustrato y generación de biogás.

Fuente: Tomado de Oyaro Kerubo Damaris y adaptado por autores [65].

De acuerdo con lo anterior, se logra conocer el máximo potencial de generación de metano y biogás de los dos escenarios propuestos, los cuales se observan en la tabla 6.

Conociendo el consumo promedio por usuario de 105.88 m^3 gas natural, se estima que los 185 usuarios sin conectar tendrían un consumo de $19587,9 \text{ m}^3$ de gas natural y 19135.4 m^3 de metano al año [4] [5], este consumo representaría solo el 18.64% del metano generado por el biodigestor municipal al año.

Los residuos generados en el municipio de El Colegio son una oportunidad para el abastecer parte de la necesidad de gas del municipio, en un escenario donde se aprovechará todo el residuo generado por la plantación del banano en El Colegio (11039 toneladas de biomasa), tendría una generación de 154171.5 m^3 de biogás y 102618.7 m^3 de metano. Si se abastecieran a los 4472 usuarios con los que cuenta el municipio se tendría un consumo promedio anual de 473495.36 m^3 gas natural y 462557.61 m^3 de metano, si se abasteciera por medio del biometano generado con el sistema municipal se podría abastecer el 22.18%, esto serian 992 usuarios. Lo anterior se basa en los datos obtenidos del año 2022.

La composición del biogás varia respecto a la materia orgánica y cada una de las materias orgánicas tiene un porcentaje de producción de metano diferente. La cantidad de metano obtenido del biogás generado es de $102618.7 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$, esto quiere decir que la composición química del biogás generado es de 66.56% CH_4 . La composición química del gas natural es de un 97.69% metano (CH_4) [71], entonces el consumo de metano de los 4287 usuarios con servicio en el año 2022 fue de 443426.63 m^3 . Entonces si se tratara de abastecer solo con el metano producido se podría suministrar el 23% del metano consumido en el municipio en el año 2022, esto serian 992 usuarios. El gas metano generado podría abastecer a los 185 usuarios que no cuentan con este servicio.

Para la solución de fincas de 5 hectáreas se resalta que el potencial de generación de biogás y metano (CH_4), es de $2147.23 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$ y $1429.22 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$ (esto es usando toda la biomasa disponible de la finca 154 ton/año de biomasa), el cual sobrepasa el promedio de consumo de gas natural de un usuario ($105.88 \text{ m}^3/\text{año}$ gas natural) del municipio [4] [5]. Por esto se hará el aprovechamiento de solo uno de los residuos el cual es el raquis de banano, ya que tiene una mayor producción de biogás por ton materia orgánica necesitando solo 2.55 ton de raquis de banano para el abastecimiento de biogás de un usuario, a comparación de las 12.17 ton o 17.42 ton necesarias con vástago o rechazo de banano. Lo que conlleva a

realizar el dimensionamiento del digestor con la biomasa de mayor potencial de generación de biogás que para el estudio corresponde al raquis de banano. En el diseño se contempló toda la biomasa del raquis de banano.

Los residuos de una finca productora de banano de 5 hectáreas pueden abastecer de biogás a 20 usuarios y de metano a 13 usuarios, dando una solución a los usuarios que no se encuentre conectado al servicio de gas natural del municipio.

La tecnología seleccionada para los biodigestores fue de laguna cubierta para el digestor municipal y tubular para digestores de fincas de 5 hectáreas, por su bajo costo de instalación y construcción, a comparación los sistemas de domo fijo y flotante. Esto se debe a los materiales usados en su construcción, los materiales de un sistema de laguna y tubular son geomembranas de PVC, caucho, RMP y polietileno, mientras que sistemas de domo fijo y domo flotante son cemento, ferrocemento, ladrillo y acero anticorrosivo. El factor económico juega un valor importante en la realización de un proyecto. El mantenimiento de un equipo representa un costo importante en la operación del sistema, los sistemas de domo fijo y de laguna requieren poco mantenimiento, debido a que el sistema de domo fijo no cuenta con partes móviles u oxidables (dependiendo del material usado para su construcción) y el sistema de laguna y tubular requiere solo de revisiones de filtraciones, al contrario de un sistema de domo flotante, los cuales cuentan con sistemas móviles para el desplazamiento del domo. La vida útil de los sistemas de laguna y tubulares se encuentra entre los 20 a 30 años, frente a unos 15 años en sistemas de domo flotante y 20 años de un domo fijo.

6.3.1 Sistema de Biodigestor Municipal.

Para calcular el volumen del biodigestor de laguna cubierta con una membrana de grosor de 1.5 mm se debe conocer la temperatura promedio de la zona en la que se realizara el proyecto. El municipio tiene una temperatura mesofílica de 24°C y el TRH (T_r) es de 45 días debido a las biomásas usadas [47] [72] [73] [65]. La relación biomasa: agua es de 1:3,5

(kg: litros) [74]. Sabiendo esto, se calcula el volumen liquido del biodigestor tubular (V_L) por medio de la ecuación (6). El total de la biomasa residual del cultivo de banano a nivel municipal es de 11039.25 ton/año, dando una carga diaria de residuos de 30244.52 kg (materia orgánica diaria). Para conocer el volumen liquido del digestor se debe saber el volumen de la carga diaria de biomasa, sabiendo que en promedio la densidad de la planta del banano es de 1.14 kg/litros [75], se obtiene que el volumen diario es de 26530.28 litros ($V_{Biomasa}$), la relación biomasa: agua da un volumen diario de 105855.82 litros (V_{agua}) [75]. Aplicando la ecuación (6) para obtener el V_L .

Se debe tener en cuenta el porcentaje del volumen liquido del digestor (V_L) y el volumen gaseoso del digestor (V_G) del biodigestor de laguna cubierta, estos tienen una relación de 85%-25% (V_L - V_G), se aplican la ecuación (7) y por medio de la ecuación (8) se obtiene el volumen total (V_T) digestor. Los resultados de estas operaciones se observan en la tabla 7.

V_L Volumen liquido m^3	V_G Volumen gaseoso m^3	V_T Volumen total de digestor m^3
5957.37	1985.79	7446.71

Tabla 7. Volumen Biodigestor Municipal

Fuente: Autores

Respecto a la empresa Proyectos a tierra la cual realiza diseños y fabricación de biodigestores, el digestor requiere una zanja de 20 m de ancho mayor, 19.29 m de ancho menor y alturar de 2 m. El digestor cuenta con una circunferencia de bolsa de 50m, se calcula el largo del digestor usando la ecuación (8) [67].

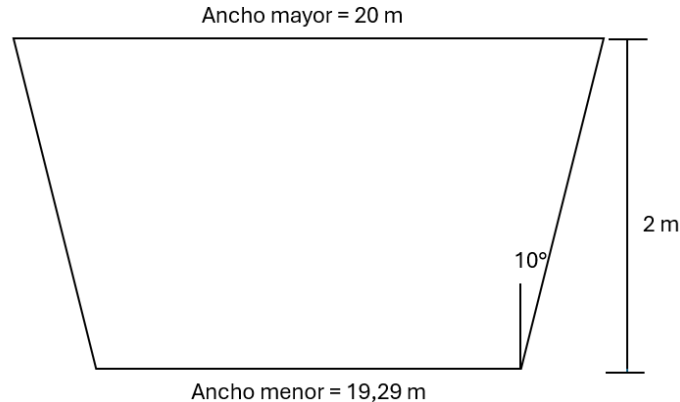


Figura 8. Largo del Biodigestor.

Fuente: Autores

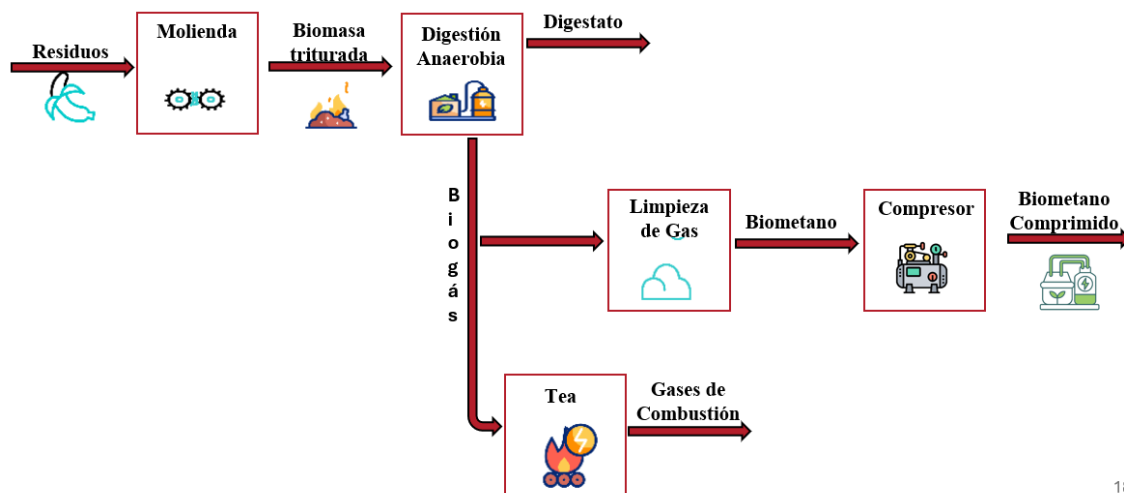
La longitud del biodigestor puede tener una relación ancho: largo entre 1:5 a 1:8 [76]. Se obtuvo que para esta área se requiere una longitud de 152 m de largo, la cual para cumplir con la relación ancho: largo se divide en dos, resultando en 2 digestores de 76 metros cada uno ($76\text{m} + 76\text{m} = 152\text{m}$), que cumplen la relación ancho: largo expuesta anteriormente. Estos digestores cuentan con las mismas dimensiones, funcionan de la misma forma y se dividen la carga diaria por igual.

La operación de carga en el biodigestor se realiza cada 8 días, comenzando en el día 1 con una carga de 211.71 toneladas de materia orgánica, hasta llegar al día 43 de la operación donde se realiza una carga de biomasa de 90.73 toneladas. Al llegar al día 45 de operación se realiza la primera descarga de 211.71 toneladas de biomasa tratada y se carga 211.71 toneladas de biomasa sin tratar, desde el día 45 cada 8 días se realizará el cargue y descargue de 211.71 toneladas de biomasa sin tratar y tratada, anualmente se hará una parada de operación para realizar mantenimiento del sistema, donde se retirará materia sedimentada y todo el volumen líquido [77]. En el biodigestor debe haber una relación *kg biomasa: litros de agua* de 1:3.5. El agua usada en el proceso se reutilizará en 4 periodos de TRH (en estos periodos el agua no se debe retirar del digestor), esto representaría un uso de agua de 9527023.97 litros (9527.02 m^3) al año, el cual al finalizar el proceso

anaeróbico, es necesario aplicar ciertos aditivos, como urea, ácido nítrico o ácido fosfórico, para mejorar sus propiedades y permitir su comercialización como Biol [78].

el cual después de terminar el proceso anaeróbico se le debe aplicar algunos aditivos como urea, ácido nítrico o ácido fosfórico, y así permitiendo vendido como Biol [77].

La materia orgánica sufre de procesos fisicoquímicos para obtener el Biol y el biogás, el orden de los procesos se puede observar en la figura 11.



18

Figura 9. Procesos físicos químicos.

Fuente. Autores

A continuación, se describirá cada una de las zonas y estepas de la planta de generación de biogás.

Zona de carga y descarga. El sistema debe contar con una zona descarga y descarga para el digestor, este debe contar con una zona lo bastante amplia para colocar la biomasa que ingresará y saldrá del biodigestor, el biodigestor tendrá una entrada y salida tubular de 10” [74].

Cubierta protectora de rayos UAV. El uso de una cubierta o sistemas de protección de los rayos UAV para membranas de digestores tubulares, prolonga la vida útil de estos, llegando a más de 20 años de vida útil [64]. Se debe contar con una infraestructura que proteja de los rayos UAV.

Molienda. El procesamiento de la biomasa es una etapa importante para digestión, la biomasa al tener más área de contacto con los lodos y un menor tamaño es más rápido de descomponer. Se debe contar con un triturador que logre reducir la materia a una dimensión menor a media pulgada y contar con una capacidad de triturado de 1.26 ton por hora, dando unas franjas de operación de 8 horas al día por 14.8 días al mes, logrando procesar la materia orgánica generada en un mes. Un modelo que cumpla estas características es el modelo WL 8 de la marca Weima [79].

Almacenamiento. Para el almacenamiento del biogás se usará un sistema AGROTEL CenoTec, el cual es un sistema de doble membrana independiente. El sistema la conforman una membrana externa, una membrana independiente interna y una membrana inferior, un soplador proporciona aire al espacio de separación de las membranas y así mantener la presión constante. El sistema de almacenamiento tiene la forma de $\frac{3}{4}$ de una esfera, las características de este sistema son [80] : Adecuado para presiones de 50 mbar, bajo costo de inversión (con un precio menor a \$76.000,00 dólares), tiempo de construcción corto, bajo costo de mantenimiento.

Este sistema incluye [80]:

1. Membrana externa
2. Membrana interna
3. Sistema de suministro de aire para separación de membrana interna y externa.
4. Sistema de salida de aire para separación de membrana interna y externa.
5. Válvulas reguladoras de presión.

6. Soplador de aire.
7. Sistema de anillo de anclaje
8. Sistema de válvulas de seguridad de presión
9. Ventana de visualización
10. Medidor de nivel laser
11. Trampa de control de presión.



Figura 10. Sistema de almacenamiento
Fuente: Empresa AGROTEL CenoTec [80].

Se usan dos sistemas de almacenamiento referencia BA100 130/300, con una capacidad de 8489 m^3 , un diámetro de 27 m y altura 20 m, estos pueden ser usados para almacenar biogás sin tratar y biogás tratado [80]. Esto representa el almacenamiento del gas generado por los biodigestores en 1.3 meses, el cual da a un periodo de venta de gas y almacenamiento prudente. El consumo mensual promedio de las 185 viviendas que no cuentan con servicio de gas natural es de 1632.31 m^3 y el promedio de generación mensual de biogás del sistema es de 12847.62 m^3 , esto representaría una retención de biogás mensual de 11215.30 m^3 . Se podría abastecer a 1469 usuarios al mes para hacer el aprovechamiento total del biogás.

Tratamiento de biogás (biogás upgrading). El biogás generado por un biodigestor no cuenta con las características para ser comercializado, este debe pasar por algunos procesos, donde se tiene por objetivo disminuir la concentración de ácido sulfhídrico (H_2S) a menos de 100 ppm, debido a que es un compuesto tóxico para la salud y que, además, puede mezclarse con el vapor de agua en el biogás y formar ácido sulfúrico (H_2SO_4), este corroe los equipos metálicos. Se debe contar con una torre de absorción y otra de desorción con agua a presión, la torre de absorción retira los contaminantes del biogás crudo como son H_2S y H_2SO_4 por medio de agua, este proceso se llama Biogás upgrader. La torre de desorción realiza el recuperación del agua usada en el tratamiento de desorción, regresándola a parámetros óptimos para continuar con el proceso. El principal parámetro para calcular en las torres son las etapas de equilibrio necesarias para la absorción y la desorción. Aún más, es importante recalcar que al conservar el biogás crudo en el proceso de combustionar generará óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x) los que son perjudiciales para el ambiente [81]. Los procesos de tratamiento del biogás permiten que este pueda ser trasportado por las redes transmisión de gas natural y ser comprimido [58].

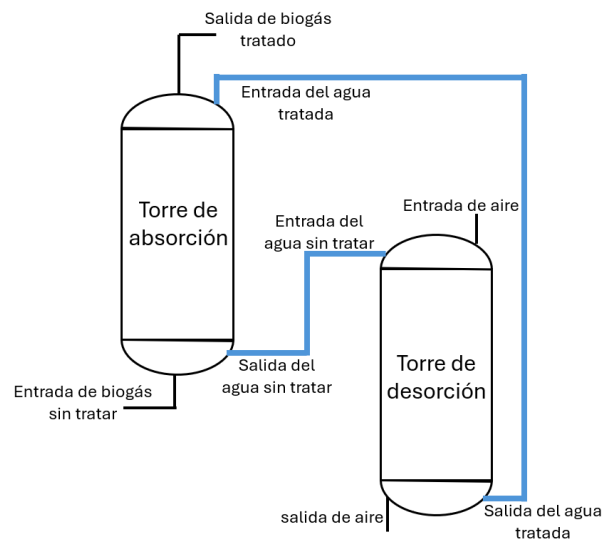


Figura 11. Ilustración de proceso de tratamiento de biogás.

Fuente: Universidad de Chile Facultad de ciencias físicas y matemáticas [58].

Antorcha (Tea). Las antorchas son sistemas de protección y seguridad para el medio ambiente. Los gases altos en metano son menos contaminantes cuando son quemados, a comparación de cuando son liberados a la atmosfera. Las antorchas o teas hacen parte de sistemas de seguridad, estas se usan en situaciones de emergencia, para la quema de forma segura y controlada los gases no utilizables o sobrantes. Estos sistemas cuentan con un panel de control, Válvula mariposa, válvula automática de accionamiento mecánico (para una operación segura), arrancador de llama (sistema de encendido de fuego), sistema de descarga de condensado mediante válvula de bola manual y infraestructura en acero inoxidable [82] [83].



Figura 12. Sistema de antorcha o tea

Fuente: Aqualimpia [82]

Compresor. Para distribuir en el municipio, el gas metano generado en el biodigestor Municipal, es necesario contemplar un sistema de compresión, esto para poder distribuirlo en pimpinas de gas. Según los cálculos realizados en la generación de biogás metano, se estima una generación diaria de 281.14 m^3 de metano. El compresor 40 HP VSD/VFD, tiene un rendimiento de 297 m^3 por hora, cumpliendo con la necesidad [84].

Mezclado. Para una mejor digestión en el biodigestor se debe instalar un sistema de agitación y empuje de la biomasa, este previene la formación de superficies densas permitiendo una homogeneidad en el volumen líquido en el biodigestor y ayudara al desplazamiento de la biomasa. Se deben instalar tres mezcladores dos en la zona de ingreso de la materia orgánica y otro a lo largo del biodigestor [85].

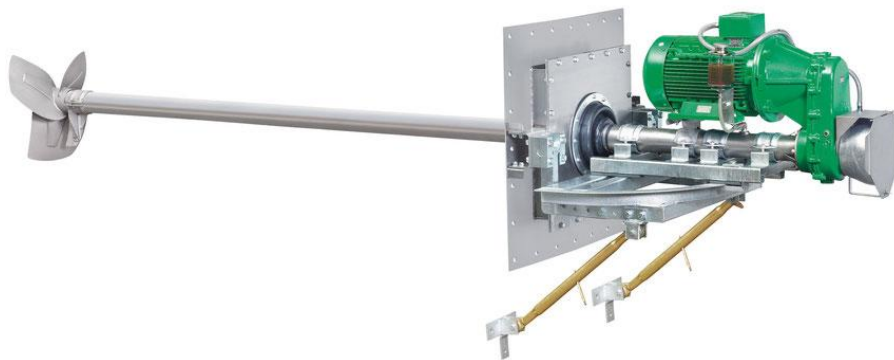
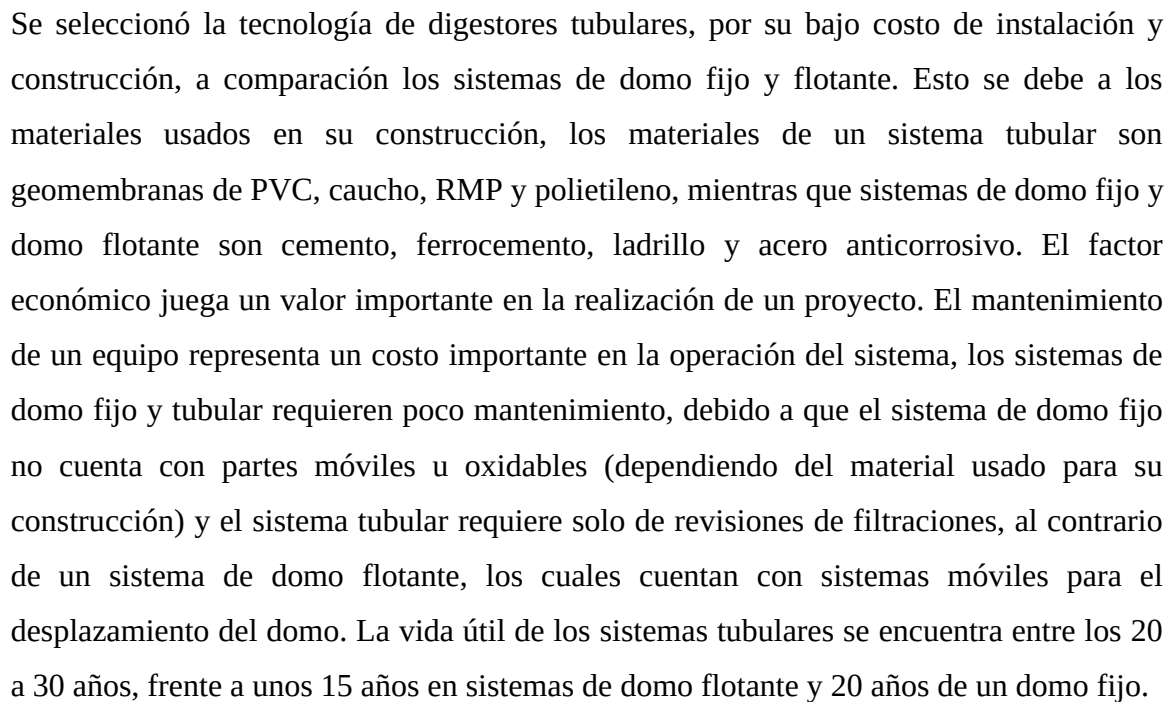


Figura 13. Sistema de Mezclado en biodigestores

Fuente: Tomada de acualimbia.com [86]

Estos deben ser de 22 kW, 400 RPM y una distancia de eje de 4 metros [86] [67].

Se realiza una distribución estimada teniendo en cuenta las dimensiones de los equipos y zonas a utilizar en la figura 14.



Fuente: Autores

6.3.2 Sistema de Biodigestor Familiar.

Se seleccionó la tecnología de digestores tubulares, por su bajo costo de instalación y construcción, a comparación los sistemas de domo fijo y flotante. Esto se debe a los materiales usados en su construcción, los materiales de un sistema tubular son geomembranas de PVC, caucho, RMP y polietileno, mientras que sistemas de domo fijo y domo flotante son cemento, ferrocemento, ladrillo y acero anticorrosivo. El factor económico juega un valor importante en la realización de un proyecto. El mantenimiento de un equipo representa un costo importante en la operación del sistema, los sistemas de domo fijo y tubular requieren poco mantenimiento, debido a que el sistema de domo fijo no cuenta con partes móviles u oxidables (dependiendo del material usado para su construcción) y el sistema tubular requiere solo de revisiones de filtraciones, al contrario de un sistema de domo flotante, los cuales cuentan con sistemas móviles para el desplazamiento del domo. La vida útil de los sistemas tubulares se encuentra entre los 20 a 30 años, frente a unos 15 años en sistemas de domo flotante y 20 años de un domo fijo.

De los tres tipos de residuos del banano usados en el proyecto (raquis, vástago y rechazo), el raquis cuenta con una mayor producción de biogás por tonelada, volviéndola la mejor opción para proveer de biogás a una vivienda. El raquis de banano requiere menor cantidad de masa para generar el consumo promedio de gas natural de una vivienda del municipio de El Colegio, el cual es de 105.88 m^3 [4] [5]. Una finca de 5 hectáreas productora de banano cuenta en promedio con 25 Ton de rechazo de raquis anualmente, del cual se requerirían para abastecer el consumo de gas anual de una vivienda 2.6 ton anuales. En el diseño se tendrá en cuenta las 25 ton de raquis de banano generada en una finca para tener un buen aprovechamiento de la biomasa generada, esto sería una cantidad diaria de biomasa de 68.45 kg. Teniendo en cuenta el porcentaje de densidad de 1.14 kg/litros, se tendría un volumen de carga diaria de 60.08 litros (*litros materia organica*) y una carga de agua diaria de 239.72 litros (*litros agua*), esto siguiendo la relación biomasa kg: agua litros 1:3.5. Se mantiene un TRH de 45 días (T_r). Con estos datos se usa la ecuación (6) para conocer el volumen liquido V_L del digestor familiar.

Conociendo el volumen liquido del biodigestor (V_L), se calcula el volumen gaseoso (V_G) por medio de la ecuación (7). Sumando los volúmenes líquidos (V_L) y gaseoso (V_G) se obtiene el volumen total V_T del digestor familiar, para esto se usa la ecuación (8) [66].

V_T Volumen liquido m^3	V_G Volumen gaseoso m^3	V_T Volumen total de digestor m^3
13,49	4,49	17,98

Tabla 8. Volumen de digestor Familiar.

Fuente: Autores

Dimensiones de biodigestor. Para dimensionar el digestor familiar se debe partir de un ancho mayor (A_M), un ancho menor (A_m) y una altura, los cuales serán de 1.2 m, 0.8 m y 1 m [87]. Conociendo esto se calcula el largo del digestor por medio de la ecuación (8).

Dimensionamiento de cilindro			
Ancho mayor (m)	Ancho menor	Altura (m)	Largo (m)
1,2	0,8	1	13,5

Tabla 9. Información Biodigestor familiar

Fuente: Tomada de Biodigestores tubulares [87].

Dimensiones de zanja:

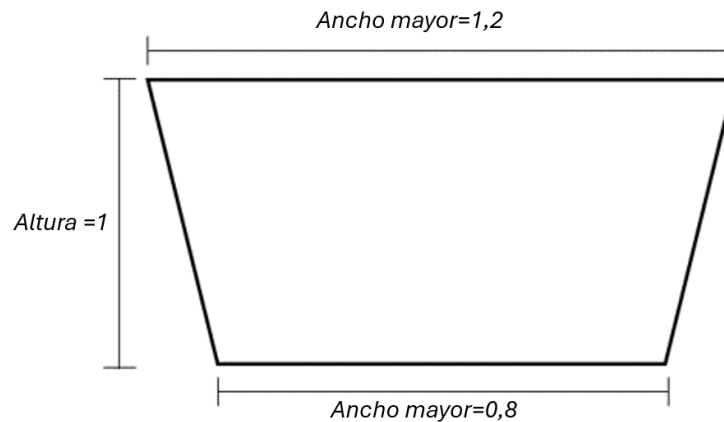


Figura 15. Tamaño Biodigestor Familiar.

Fuente: Autores

Las dimensiones de las membranas se encuentran comercialmente. Además, el biodigestor debe contar con una salida de gas en la parte superior central de la campana, esta puede ser de $\frac{3}{4}$ " a 1" y debe contar con una válvula artesanal de seguridad, la cual evitara presiones altas en el sistema y otra membrana que puede ser de las mismas dimensiones o menor que

el biodigestor para acumular el biogás generado [66]. La entrada y salida del biodigestor es de 4". En la siguiente imagen visualizar las partes de un biodigestor familiar [66].

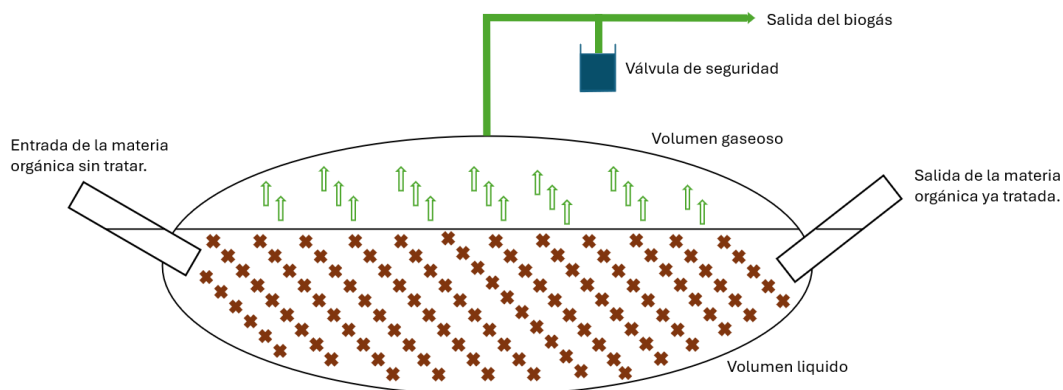


Figura 16. Biodigestor Familiar

Fuente: Tomada de Martí Herrero, Jaime Adaptada por autores [66].

La biomasa debe pasar por un proceso de molienda o triturado, para ayudar con la digestión y descomposición. El agua usada en el proceso se reutilizará en 4 periodos de TRH, esto representaría un uso de agua de 21575 litros al año, el cual después de terminar el proceso anaeróbico puede ser vendido como Biol.

La operación de carga de biomasa en el biodigestor se realiza cada 8 días, comenzando en el día 1 con una carga de 479,45 kg de materia orgánica, hasta llegar al día 43 de la operación donde se realiza una carga de biomasa de 205.47 kg. Al llegar al día 45 de operación se realiza la primera descarga de 479.45 kg de biomasa tratada y se carga 479.45 kg de biomasa sin tratar, desde el día 45 cada 8 días se realizará el cargue y descargue de 479.45 kg de biomasa sin tratar y tratada, anualmente se hará una parada de operación para realizar mantenimiento del sistema, donde se retirará materia sedimentada y se retirara todo el volumen líquido [77]. Cada carga y descarga de biomasa de banano debe estar acompañada de su relación *kg biomasa de banano: litros de agua* de 1:3.5.

6.4 VIABILIDAD ECONÓMICA.

Para determinar la viabilidad económica de las dos alternativas propuestas, se realizaron indagaciones con empresas que prestan este tipo de servicio, lo que respalda técnicamente que los valores presentados en esta propuesta corresponden a valores reales. Los biodigestores tienen una vida útil de 30 años según indagaciones con los fabricantes e instaladores.

Además se tiene en cuenta la “Lista de bienes y servicios para proyectos de generación energía eléctrica a partir de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) y Lista de bienes y servicios para acciones o medidas de gestión eficiente de energía (GEE)” según resolución No. 000712 de 2024 en la cual se explica los beneficios tributarios producto de las inversiones para proyectos de FNCE, si bien la resolución No. 000712 de 2024 realiza inversiones para los proyectos y sistemas para uso energético de la biomasa estos son exclusivamente para generación de energía eléctrica, no obstante, manejan inversiones para todos los proyectos FNCE los cuáles serán mencionados y aplicados según correspondan [88].

A continuación, se presentan las tablas que detallan cada uno de los valores correspondientes a las alternativas de viabilidad determinadas en el proyecto, las cuales son: Biodigestor Municipal y Biodigestor familiar.

6.4.1. Sistema de Biodigestor Municipal.

Para este biodigestor se pretende analizar la viabilidad de instalación a partir de la recolección de los residuos del banano generados en todo el municipio y con ellos generar biogás el cual se comprimirá en cilindros que se venderán a las 183 familias que no tienen acceso al gasoducto, durante el análisis de este biodigestor se tomaron en cuenta los siguientes aspectos resumidos a en la tabla 10:

Montaje planta de aprovechamiento de residuos orgánicos				
Biodigestor macro	Costos Directos de Implementación (COL)	IVA	Beneficio	Total
Terreno	\$6.075.000.000	\$-	N/A	\$6.075.000.000
Instalaciones locativas	\$70.000.000	\$-	\$10.000.000	\$60.000.000
Adecuaciones locativas zona de compresión	\$48.757.598	\$-	\$24.000.000	\$24.757.598
Trituradora de biomasa	\$330.920.373	\$62.874.871	\$62.874.871	\$330.920.373
Biodigestor y adecuaciones	\$600.000.000	\$114.000.000	\$104.500.000	\$609.500.000
Zona de tratamiento de gas	\$24.175.560	\$4.593.356	N/A	\$28.768.916
Zona de compresión	\$66.984.107	\$12.726.980	\$9.358.072	\$70.353.016
Zona de almacenamiento	\$610.575.000	\$116.009.250	\$116.009.250	\$610.575.000
Gastos Legales y registros sanitarios				\$91.835.142
Total				\$7.901.710.045

Tabla 10. Costos montaje planta de aprovechamiento de residuos orgánicos

Fuente: Autores

Montaje de planta de aprovechamiento de residuos orgánicos:

a.) Terreno

Es necesario establecer un área en donde se van a instalar los equipos para la biodigestión de los residuos, su transporte, compresión, y demás actividades que se puedan realizar en las instalaciones, en este caso se indago un terreno de **16.264 m²** el cual tiene un valor de **\$7.318.800.000 COP**. De acuerdo con esta cifra, se estima que en el municipio de Mesitas del Colegio un metro cuadrado (m²) de terreno, tiene un costo aproximado de \$ 450.000 COP y para el montaje de la planta de aprovechamiento se requiere un terreno de aproximadamente **13.500 m²** el cual se estima tendría un costo de **\$ 6.075.00.000 COP**. [89].

Esta área se contempla de acuerdo con las dimensiones y características del proyecto, el cual se detalla su distribución en la figura 17 Planos planta de aprovechamiento de residuos orgánicos.

b.) Instalaciones Locativas

En este rubro está contemplado las adecuaciones de infraestructura necesarias para el desarrollo de las actividades administrativas y comerciales del proyecto, que cumplan con los estándares legales, técnicos y de seguridad establecidos en la legislación colombiana. se incluyeron estimaciones de los espacios locativos como: la recepción, el baño, los techos de la zona de compresión, el cubículo de la sub. Estación (si aplica) y techos adicionales para protección de la motobomba, estas obras civiles se estimaron un valor de **\$ 70.000.000 COP**. Aplicando los beneficios de la resolución No 000712 del 2024 se obtiene un descuento tributario por instalaciones eléctricas por lo que se contempló este rubro en **\$60.000.000 COP** [88].

c.) Adecuaciones zona de compresión

En la siguiente tabla se estiman los costos de adecuación de la zona de compresión, la cual está basada en información técnica y económica suministrada por una empresa del sector [90], incluyendo los beneficios mencionados anteriormente en la resolución instalaciones eléctricas con costo 0 [88].

Factores	Observaciones	valor
Adecuaciones de Terreno Zona de compresión	Adecuaciones mecánicas de instalación equipos, ensamble poste de descarga; conexión mecánico entre equipos poste compresor almacenamientos y surtidor. Adecuaciones de soportaría tuberías, Instalación, tuberías de venteo. Instalación red contraincendios, Instalación sistema de aire comprimido.	\$ 8.820.000
	Adecuaciones eléctricas Estación GNV Según Diseños entregados alcance de la actividad: Instalación de sistema puesta a tierra para zona compresor y zona tablero con sus respectivas soldaduras en calibre y diámetro según diseño. Tendido de tuberías eléctricas y conductores para sistema potencia compresor. Tendido de tuberías eléctricas y conductores señales control desde tablero control hasta compresor. Tendido de tubería eléctrica y conductores surtidor GNV. adecuación puntos paradas de emergencia en zonas requeridas. Instalación de puntos de iluminación perimetral en zonas requeridas. Instalación de puntos eléctricos Canopie, luminaria, sistema POS.	\$ 15.000.000

Instalación de elementos a prueba de explosión en áreas clasificadas según normativa eléctrica.	
Servicio técnico puesta en marcha equipos de compresión: Posicionamiento de equipos Conexionado eléctrico mecánico y de cometidas punto cero a equipos, verificación de condiciones zona equipos de compresión, pruebas de arranque compresor, presurización equipo compresor, almacenaje, ajustes de parámetros tablero de control y pruebas de funcionamiento sistema completo, Calibración de instrumentación semestral y pruebas para inicio de operación estación.	\$ 5.500.000
Diseños Eléctricos y memorias de cálculos para proceso de certificación RETIE, Acompañamiento visita de certificación.	\$ 9.000.000
Secado de tubería con Nitrógeno Y Prueba Neumática.	\$ 650.000
Prueba hidrostática Tubería alta presión equipos.	\$ 2.349.998
SUBTOTAL	\$ 41.319.998
Administrativo 7%	\$ 2.892.400
Imprevistos 6%	\$ 2.479.200
Utilidades 5%	\$ 2.066.000
TOTAL	\$ 48.757.598

Tabla 11. Adecuaciones locativas zona de compresión.

Fuente: VERA GAS SAS ESP Adaptada por autores [90].

d.) Zona de molienda o trituración.

El Biodigestor requiere 227 toneladas de residuos orgánicos semanales, por lo que se requiere procesar 37.9 toneladas diarias durante 6 días laborales. Para esto, se presupuestó una trituradora de 35 HP de potencia capaz de procesar esa cantidad de toneladas con un valor de **58.600 USD** y un costo de importación a Colombia aproximado de **22.661,18 USD** por medio del de casillero virtual de la empresa 4-72, lo que corresponde a un total de **82.261 USD** [91] [92]. Se realiza el cálculo con un valor de la TRM del día de \$4022,81

COP lo que equivale a **\$330.920.373,41 COP**. Se aplica el beneficio tributario de exclusión del IVA según resolución No. 712 de 2024 [88].

Calculadora de costos de envío
SERVICIOS POSTALES NACIONALES S.A.
Los valores calculados a continuación son aproximados y para uso de referencia.

mensajero

Ahora también traemos tus paquetes desde Europa

Origen del paquete

Estados Unidos

Destino del paquete

CUNDINAMARCA

Ciudad

EL COLEGIO

Contenido del paquete

Piezas y accesorios para vehículos

Valor Declarado en Dólares

58600

Peso en libras

3500

Calcular

Resultado en dólares estadounidenses

Costo de envío	9.669,86
Entrega	0.00
Seguro	586.00
Derechos de aduana	0.00
IMPUESTO	11.555,42
Costo por recaudación de impuestos	849.90
Tarifa de material peligroso	0.00
TOTAL ESTIMADO DE IMPUESTOS Y FLETES	22.661,18

Recuerde:

El valor final de su envío puede variar dependiendo del valor declarado del producto, peso, naturaleza de la mercancía y políticas de importación que apliquen a sus productos.

Figura 17. Costo aproximado de importación maquinaria
Fuente: Pagina web Casillero virtual 4-72 [92].

e.) Biodigestión

Para el biodigestor se establecieron unas dimensiones en el numeral 6.3 del presente documento, comparando con proyectos del sector comercial y aclarando de que los precios varían respecto a las dimensiones y el grosor de la membrana que se use. De acuerdo con esto se estima un valor de **\$ 600.000.000 COP**. Se aplica el beneficio tributario de exclusión del IVA según resolución No. 712 de 2024 en el biodigestor [88].

Soporte documental/propuesta Empresa	Biodigestor Municipal	Observaciones	Costos Directos de implementación (COP)
Proyectos a Atierra	Adecuaciones para biodigestor.	Costo de movimiento de tierras.	\$ 15.000.000
Proyectos a Atierra	Adecuaciones para biodigestor.	Costo de adecuación de terreno.	\$ 29.000.000
Ferretería S.O.	Trasporte Equipos.	Costo necesario para el transporte de los equipos como el biodigestor, trituradora, estructura metálica, tubería, etc	\$ 6.000.000

Proyectos a Atierra	Biodigestor e instalación.	Compra e instalación de biodigestor y todos los elementos necesarios para su operación y una tea para quema de gas.	\$ 550.000.000
		Total	\$ 600.000.000

Tabla 12. Costos zona de biodigestión

Fuentes: Proyectos a Tierra [93], Ferretería S.O Adaptada por autores.

f.) Tratamiento de gas

El biogás generado por un biodigestor no cuenta con las características para ser comercializado, este debe pasar por algunos procesos donde se tiene por objetivo disminuir la concentración de ácido sulfhídrico. También se absorbe dióxido de carbono en el proceso [81]. La revisión de un estimado económico de este factor es importante para el abastecimiento de las zonas no conectadas, proyectos y documentos de investigación fueron útiles en este proceso. Según investigaciones de la universidad de Chile se estima un valor de **\$24.175.560**, este costo sería similar al sistema requerido en nuestro proceso [81].

g.) Zona de compresión

Para la zona de compresión lo más importante a tener en cuenta es el compresor y su forma de energizar, dentro de las investigaciones que se realizaron no se encuentra un compresor que tenga las características de comprimir 281.14 m^3 día, que es lo estimado que se tienen dentro de los cálculos realizados, dentro de las investigaciones realizadas se consultó con empresa expertas en el campo como VERA GAS SA ESP y lo más recomendado es enviarlo a fabricar con las características solicitadas debido a que los de fabrica normalmente están diseñados para comprimir de 150 m^3 a $1900 \text{ m}^3/\text{h}$ lo cual esta sobredimensionado para la actividad que se tiene prevista [94], se indago un compresor que comprime a $303.8 \text{ m}^3/\text{h}$ el cual esta valorizado en **\$ 12.099,99 USD** aproximadamente **\$ 49.253.009 COP** [95]de acuerdo características del equipo se cotizo la importación con la empresa 4-72 con un valor aproximado de **\$ 4.356 USD** [92] con estos valores en cuenta tenemos un valor aproximado de **\$ 66.984.107 COP**. Se aplica el beneficio tributario de exclusión del IVA según resolución No. 712 de 2024 en el compresor [88].

h.) Zona de almacenamiento

Para esta zona se contemplaron 2 membranas tipo esfera con un valor de **\$ 150.000 USD** con valor aproximado en pesos colombianos de **\$ 610.575.000 COP** [96]. Se aplica el beneficio tributario de exclusión del IVA según resolución No. 712 de 2024 [88].

Gastos Legales y de registros sanitarios

Se contemplaron los gastos legales y de registros sanitarios necesarios para el correcto funcionamiento de la planta, para los gastos legales se tomaron en cuenta que el valor de los posibles activos necesarios para la creación de la planta es **\$7.826.412.638 COP**, este valor es necesario para el pago de algunos conceptos legales los cuales serán mencionados en la tabla 13 y la tabla 14 serán mencionados los registros sanitarios necesarios

Concepto	Valor Aproximado
Escritura pública los estatutos sociales (0,27 % del valor del capital de la sociedad + IVA)	\$ 24.512.324
Registro ante la cámara de comercio	
Derecho por registro de matrícula	\$ 103.000
Impuestos de registro (0,7% del valor del capital de la sociedad)	\$ 54.784.888
Formulario de registro (Aproximadamente COP\$ 3.600)	\$ 3.600
Inscripción de libros (COP\$ 27.000)	\$ 27.000
Derecho de inscripción de cada libro (COP\$ 27.000)	\$ 27.000
Registro ante la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (“DIAN”) y obtención del Registro Único Tributario (“RUT”). Sin Costo.	\$ -
Comprar y registrar los respectivos libros societarios (COP \$ 6.000)	\$ 6.000
Total	\$ 79.463.813

Tabla 13. Gastos de Registros legales

Fuentes: la República [97] y Neolo [98] Adaptada por autores.

Código Servicio	Concepto	Valor Tarifa 2023
4662	Registro de productor de bioinsumos y extractos vegetales de uso agrícola	\$ 1.358.219
4669	Registro de departamento técnico de pruebas de eficacia de bioinsumos y extractos vegetales de uso agrícola	\$ 1.358.219

4671	Registro de venta de bioinsumos y extractos vegetales de uso agrícola	\$ 1.731.886
4676	Registro de uso de bioinsumos y extractos vegetales de uso agrícola	\$ 856.148
4681	Registro de productor (Fabricante, formulador, envasador o empacador) de fertilizantes y/o acondicionadores de suelos	\$ 1.358.219
4688	Registro de unidades técnicas de pruebas de eficacia de fertilizantes y acondicionadores de suelos	\$ 1.358.219
4690	Registro de venta de fertilizantes	\$ 1.810.512
4701	Concepto técnico previo a la creación de empresas de aplicación de insumos agrícolas por vía terrestre en cultivos o en productos vegetales almacenados	\$ 539.907
	Registros adicionales no contemplados	\$ 2.000.000
	Total	\$ 12.371.329

Tabla 14. Valor Registros Sanitario

Fuentes: Instituto Agropecuario Colombiano Adaptada por autores [99].

Costos de operación anual

A continuación, se mencionarán los costos anuales de operación de la planta resumidas en la tabla 15.

Costos anuales de operación			
Ítem	Valor	IVA	Total
Terreno	\$ 4.000.000	\$760.000	\$4.760.000
Instalaciones locativas	\$3.000.000		\$3.000.000
Materia Prima	\$573.885.584	\$ -	\$573.885.584
Recolección Materia Prima	\$126.720.000	\$ -	\$126.720.000
Personal	\$373.315.898	\$ -	\$373.315.898
Trituradora de biomasa	\$77.982.400	\$ -	\$77.982.400
Biodigestor y torre de tratamiento	\$ 1.200.000	\$ 228.000	\$1.428.000
Zona de compresión	\$7.415.200		\$7.415.200
Envase, etiquetado y distribución	\$ 39.013.164.750	\$ -	\$39.013.164.750
Imprevistos	\$60.000.000		\$ 60.000.000
Total			\$40.241.671.832

Tabla 15. Costos Anuales de operación

Fuente: Autores

a.) Terreno

Para el mantenimiento del terreno se deberá tener en cuenta, la fumigación de las oficinas, poda de mala hierba que puedan aparecer y servicios forestales que se puedan presentar estimando un valor de **\$ 4.000.000 COP** anuales.

b.) Costos administrativos

En las instalaciones locativas no se tiene en cuenta un valor adicional debido a que el personal contratado para el tema de mantenimiento, trituración, y llenado de Biol tendrá dentro de sus funciones el mantenimiento de las instalaciones, se tendrá en cuenta el valor de los elementos de la limpieza (recogedor, traperero, balde, escoba , jabón, etc), el valor de la papelería (papel, lapicero, lápiz, borrador, etc) y el valor de la cafetería (agua, café, etc), por último se estiman un valor mensual de servicios de (agua, internet, luz) de \$170.000 mensual solo en la oficina, teniendo contemplado un valor de **\$ 3.000.000 COP** anual.

c.) Materia prima

Si bien la idea es que el municipio ofrezca estos residuos que no están siendo aprovechados ayudando a la transición energética, se contempla un valor de **\$ 50 COP** por kilogramo el cual será pagado a las fincas productoras de los residuos seleccionados, teniendo en cuenta la producción anual requerida es de 10.888.008 kg por lo que para la materia prima se contemplara un valor de **\$ 544.400.400 COP** anual. Se llego a este valor teniendo como referencia que Bogotá limpia una empresa especialista en recolección de residuos paga un valor de \$ 143.000 COP * m^3 por cantidad de residuos especiales aprovechables recolectados [100], consideramos que el valor que se ajusta de acuerdo a la referencia es de (\$50 COP kg) valor estimado y que cambiara anualmente.

Para determinar el valor total del costo de la materia prima se debe considerar los litros de agua que se necesitan adquirir, el costo total del metro cúbico de agua para el sector comercial, incluyendo el alcantarillado y aplicando un porcentaje de contribución del 55%,

sería **\$3,957.82 COP m^3** [101], se tienen que suministrar 9.527.024 lt de agua aproximadamente $9527 m^3$ para un valor total **\$ 37.801.516 COP** anual.

d.) Recolección materia prima

Este rubro es una parte importante del proyecto debido a que se deberá de tener en cuenta el valor de la recolección de la materia prima a procesar para la biodigestión la cual se estima que sean 226,833 toneladas cada 15 días, la empresa Ferredepósito S.O en mesitas del colegio presta el servicio de transporte de material mixto(escombros) con un valor de \$ 660.000 por viaje de capacidad total de las volquetas (30 ton) en donde incluye la recolección del material o residuo, transporte y descarga en el punto, se presupuesta un valor de \$ 5.280.000 diarios teniendo un valor anual de **\$ 126.720.000 COP**.

e.) Personal

El personal que se requiere para la operación de la planta es algo fundamental para el éxito de esta por lo cual se estimó el valor a pagar por el personal en la planta en base a la siguiente tabla:

BASE LIQUIDACION PRESTACIONES SOCIALES	5.000.000,00
PRIMA	416.667
VACACIONES	208.333
CESANTIAS	416.667
INTERES DE CESANTIAS	50.000
SALUD	-
PENSION	600.000
ARL	348.300
CAJA DE COMPENSACION	200.000
DOTACIÓN (3 ENTREGAS AL AÑO)	825.000
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL	200.000
	2.239.966
TOTAL COSTO EMPLEADO MENSUAL	7.239.966
TOTAL COSTO EMPLEADO ANUAL	87.904.592

Tabla 16. Liquidación prestacional 2024

Fuente: POLITÉCNICO DE SURAMÉRICA EDUCACIÓN CERTIFICADA [102] y adaptada por autores

Personal estimado para la operación de la planta.

Cant.	Cargo	Sueldo Mensual	Sueldo Anual
1	Administrador de la empresa Con habilidades comerciales	\$ 4.343.980	\$ 53.072.755
1	Contador x honorarios	\$ 3.500.000	\$ 42.000.000
1	Ingeniero de planta	\$ 4.625.578	\$ 56.459.939
3	Técnico	\$ 11.159.949	\$ 136.694.388
1	Coordinador de Ventas	\$ 4.343.980	\$ 53.072.755
1	Auxiliar administrativo	\$ 2.593.588	\$ 32.016.061
Total			\$ 373.315.898

Tabla 17. Personal de la planta

Fuente: Autores

f.) Gastos de Financiación

Para este rubro se promedió 1% de interés mensual teniendo en cuenta la consulta en dos bancos como lo son BBVA [103] y Banco Caja social [104], tasa que se estipula para proyectos de inversión. Para implementar el proyecto se necesitan **80.000.000.000 COP** este valor cubrirá el gasto de creación de la planta y el primer año de operación. Para esta financiación se venderán acciones por el 70% del valor inicial y el 30% se adquiere con financiación crédito con la tasa de interés promediada anteriormente.

Mes	Valor inicial	Interés	Capital	Total cuota mes	Saldo Capital
					24.000.000.000
1	24.000.000.000	240.000.000	200.000.000	440.000.000	23.800.000.000
2	23.800.000.000	238.000.000	200.000.000	438.000.000	23.600.000.000
3	23.600.000.000	236.000.000	200.000.000	436.000.000	23.400.000.000
4	23.400.000.000	234.000.000	200.000.000	434.000.000	23.200.000.000
5	23.200.000.000	232.000.000	200.000.000	432.000.000	23.000.000.000
6	23.000.000.000	230.000.000	200.000.000	430.000.000	22.800.000.000
7	22.800.000.000	228.000.000	200.000.000	428.000.000	22.600.000.000
8	22.600.000.000	226.000.000	200.000.000	426.000.000	22.400.000.000
9	22.400.000.000	224.000.000	200.000.000	424.000.000	22.200.000.000
10	22.200.000.000	222.000.000	200.000.000	422.000.000	22.000.000.000

116	1.000.000.000	10.000.000	200.000.000	210.000.000	800.000.000
117	800.000.000	8.000.000	200.000.000	208.000.000	600.000.000
118	600.000.000	6.000.000	200.000.000	206.000.000	400.000.000
119	400.000.000	4.000.000	200.000.000	204.000.000	200.000.000
120	200.000.000	2.000.000	200.000.000	202.000.000	0

Tabla 18. Préstamo

Fuente: Autores

g.) Trituradora

Para la trituradora o la zona de molienda, se debe tener en cuenta el consumo eléctrico mensual de la trituradora el fabricante menciona características de consumo de 240 kWh en 8 horas, en mesitas del colegio el valor aproximado de \$ 891 hora [105], lo que equivale a un consumo de anual aproximado de \$76.982.400, se tiene en cuenta el valor de la mano de obra de mantenimiento de la maquina con el personal contratado, para los mantenimientos correctivos y partes se estima un valor de \$ 1.000.000 anual. Para un total de **\$ 77.982.400 COP.**

h.) Biodigestión y torre de tratamiento

La mano de obra para el mantenimiento mensual del equipo está contemplada en la contratación del personal, para algún correctivo o algún repuesto necesario se contemplan el valor de **\$ 1.200.000 COP** anuales aclarando que estos mantenimientos no son frecuentes y pueden aplicarse hasta el tercer año con el cambio de filtros o hasta cinco años.

i.) Compresión

Este rubro es similar al de la trituradora se debe considerar el consumo eléctrico mensual del compresor, el fabricante menciona características de consumo de 20 kWh en y a que el compresor está capacitado para comprimir todo el metano generado diariamente en una hora esta hora será la referencia de consumo eléctrico, en mesitas del colegio el valor aproximado de \$ 891 hora [105], lo que equivale a un consumo de anual aproximado de \$6.415.200 COP, se tiene en cuenta el valor del mantenimiento de la maquina con el personal contratado pero algún mantenimiento correctivo y sus partes no por lo que se estima para este rubro \$ 1.000.000 anual. Para un total de **\$ 7.415.200 COP.**

j.) Envase, etiqueta, aditivos, permisos de distribución y distribución

Para el envase del Biol junto con sus aditivos, etiqueta, permisos y distribución se estima un valor de **\$ 21.000 COP x 4L**.

k.) Imprevistos

Son aquellos valores que se surgen en un proyecto por situaciones no contempladas en un proyecto, se contempla el valor de **\$ 5.000.000 COP** mensuales para un total de **\$ 60.000.000 COP** anuales por este concepto.

l.) Depreciación

Corresponde al desgaste por el uso de los activos móviles e inmóviles como el caso de la propiedad planta y equipo. Para determinar la depreciación se tienen en cuenta los activos mencionados en la tabla 19 la cual, basándonos en las fichas técnicas de cada equipo, herramienta, activo, será contemplada con su respectiva vida útil, al igual que un valor de salvamento al finalizar cada periodo.

Maquinaria, Equipo, y/o Herramienta	Valor	Valor de salvamento	Vida útil en años	Depreciación	Observación
Activos locativos	\$ 70.000.000	\$ 10.500.000	5	\$ 11.900.000	Mesas, computadores, estructura, luces, etc
Trituradora Weima WL 8	\$ 330.920.373	\$ 49.638.056	15	\$ 18.752.154	Trituradora encargada de reducir a partes más pequeñas los residuos recolectados
Biodigestor municipal	\$ 600.000.000	\$ 90.000.000	20	\$ 25.500.000	Biodigestor encargado de procesar los residuos triturados para producir biogás
Sistema de tratamiento de gas	\$ 24.175.560	\$ 3.626.334	10	\$ 2.054.923	Sistema de tratamiento de biogás por medio de upgrading.
Compresor 40 HP VSD/VFD	\$ 66.984.107	\$ 10.047.616	20	\$ 2.846.825	Compresor encargado de comprimir el biogás producido para ser

					despachado a los usuarios.
Sistema de almacenamiento BA100 130/300	\$ 610.575.000	\$ 91.586.250	20	\$ 25.949.438	Sistema de esferas de almacenamiento de biogás.
Total Depreciación				\$ 87.003.339	

Tabla 19. Depreciación

Fuente: Autores

m.) Amortización

Es el valor que se traslada al gasto producto del consumo de un activo en un periodo de tiempo determinado. Para el proyecto corresponde a los gastos por concepto de creación y registro de la empresa (\$91.835.142 COP), teniendo como periodo de amortización 5 años.

n.) Impuestos

Son contribuciones obligatorias que el estado cobra por realizar actividades comerciales, industriales y de servicios, las personas naturales y/o jurídicas, como también por la posesión de bienes y/o activos que incrementan el patrimonio de un contribuyente. Para el proyecto se contempla el 10% de impuestos sobre el Flujo de Caja, esto debido a que el gobierno nacional a través del Ministerio de Industria y Comercio están generando beneficios tributarios a los proyectos productivos que se tengan como propósito la sostenibilidad ambiental, económica y social. Para ello las empresas que formulen propuestas sostenibles aplican descuentos en el pago de impuesto que pueden llegar hasta el 0%, estos beneficios son brindados principalmente para proyectos que impulsen el desarrollo municipal [106].

Ingresos anuales

Por último, se tienen en cuenta unos posibles ingresos equivalente a la compresión de los cilindros con metano generado de la biodigestión y el Biol.

a.) Biogás

Se tienen los datos de que aproximadamente 183 familias no tienen servicio de gas, y se tiene una cantidad aproximada de consumo de 105 m^3 mensuales por familia, según vida

gas estos metros cúbicos representan un valor aproximado entre \$ 170.000 a \$ 180.000 [107], por lo que tomando este nicho de posibles clientes (183), en donde se obtienen unos ingresos aproximados de **\$ 384.300.000 COP**.

b.) Biol

El Biol es una herramienta valiosa para mejorar la fertilidad del suelo, aumentar la producción de cultivos. La comercialización de este derivado del proceso anaeróbico es una oportunidad para aprovechar en un proyecto de generación de biogás. Según Colombia productiva la venta de biofertilizante ha aumentado a una tasa promedio anual del 24% en los últimos diez años, y algunos actores relevantes del mercado proyectan un crecimiento anual entre el 18% y el 25% para los próximos años [108], Además mencionan que como respuesta a la baja fertilidad del suelo, el uso de fertilizantes sintéticos se encuentra en constante aumento, la Asociación Internacional de Fertilizantes (IFA) estima que la demanda mundial de fertilizantes alcanzará los 200 millones de toneladas para el año 2030, un aumento del 30% con respecto a los niveles actuales [108].

De acuerdo con la información anterior, el proyecto estima tres escenarios en ventas: optimista en 90%, conservador en un 70% y negativo en un 50% de ventas de Biol. Dada la demanda, se realizó una revisión del costo de este producto en el mercado, incluyendo sus aditivos y permisos necesarios para comercializar el Biol en el cual se estima el precio de distribución y venta de alrededor de **\$ 40.000 COP x 4lt** [109].

Los biodigestores tendrán tres tipos de escenarios para la producción de Biol (optimista, conservador, negativo), en atención a los factores principales que afectan la producción final de Biol: a) pérdidas por evaporación (5-6 % en climas cálidos) [110]; b) retención en sólidos (12-18% del líquido queda atrapado en la fibra de los residuos del banano) [111]; c) filtrado (2-3% según el método usado) [112]. Se necesitan 9.527.024 litros al año para la biodigestión lo que equivale a los siguientes tres escenarios:

- ✓ Escenario Negativo (Trituración básica, clima húmedo) Evaporación 6%, Retención 18%, Filtrado 3%).
- ✓ Escenario Conservador (Trituración fina, sellado óptimo) Evaporación 5%, Retención 15%, Filtrado 2%.
- ✓ Escenario Optimista (Trituración industrial + prensa de alta presión) Evaporación 4%, Retención 12%, Filtrado 1%.

Escenario	Trituración	Evaporación	Retención	Filtrado	Biol Neto (L/año)
Negativo	Básica	6%	18%	3%	6.954.728
Conservador	Fina	5%	15%	2%	7.431.079
Optimista	Industrial	4%	12%	1%	7.907.430

Tabla 20. Escenarios Biol.

Fuente Autores

Con esta información se determina los ingresos anuales relacionados en la siguiente tabla:

Escenario	Biol Neto (L/año)	N° de Envases (4L)	Precio por Envase (COP)	Ingresos Anuales (COP)
Negativo	6.954.728 L	1.738.682	\$ 40.000	\$69.547.280.000
Conservador	7.431.079 L	1.857.770	\$ 40.000	\$74.310.800.000
Optimista	7.907.430 L	1.976.858	\$ 40.000	\$79.074.320.000

Tabla 21 Posibles ingresos Biol

Fuente Autores

Para los ingresos se tienen en cuenta los dos escenarios conservadores obteniendo como resultado ingresos anuales por venta de Biol de aproximadamente **\$52.017.560.000 COP**. Se realiza análisis para determinar el tiempo de retorno de la inversión, VPN y TIR, tomando una tasa de descuento del 12,75 % para este año 2024 [113].

Año (n)	Ingresos (I) Aumento 5%	Costos (C) Aumento 5%	Cuota Financiación	Depreciación	Amortización	Flujo Caja Operativo	Impuestos 10%	Flujo de Caja Neto	Valor Presente Neto (VPN)
0	0	0				-\$7.901.710.045		-\$7.901.710.045	
1	\$ -	\$40.241.671.832	\$5.148.000.000	\$87.003.339	\$18.367.028	-\$45.495.042.199		-\$45.495.042.199	-\$40.350.370.022
2	\$52.401.860.000	\$42.253.755.423	\$4.860.000.000	\$87.003.339	\$18.367.028	\$5.182.734.209	\$518.273.421	\$4.664.460.788	\$3.669.174.321
3	\$55.021.953.000	\$44.366.443.195	\$4.572.000.000	\$87.003.339	\$18.367.028	\$5.978.139.438	\$597.813.944	\$5.380.325.494	\$3.753.694.278
4	\$57.773.050.650	\$46.584.765.354	\$4.284.000.000	\$87.003.339	\$18.367.028	\$6.798.914.928	\$679.891.493	\$6.119.023.435	\$3.786.307.784
5	\$60.661.703.183	\$48.914.003.622	\$3.996.000.000	\$87.003.339	\$18.367.028	\$7.646.329.193	\$764.632.919	\$6.881.696.274	\$3.776.702.260
6	\$63.694.788.342	\$51.359.703.803	\$3.708.000.000	\$75.103.339		\$8.551.981.199	\$ 855.198.120	\$7.696.783.079	\$3.746.363.759
7	\$66.879.527.759	\$53.927.688.993	\$3.420.000.000	\$75.103.339		\$9.456.735.426	\$945.673.543	\$8.511.061.884	\$3.674.243.160
8	\$70.223.504.147	\$56.624.073.443	\$3.132.000.000	\$75.103.339		\$10.392.327.364	\$1.039.232.736	\$9.353.094.628	\$3.581.153.394
9	\$73.734.679.354	\$59.455.277.115	\$2.844.000.000	\$75.103.339		\$11.360.298.900	\$1.136.029.890	\$10.224.269.010	\$3.472.028.750
10	\$77.421.413.322	\$62.428.040.971	\$2.556.000.000	\$75.103.339		\$12.362.269.012	\$1.236.226.901	\$11.126.042.110	\$3.351.005.911
11	\$81.292.483.988	\$65.549.443.019		\$73.048.417		\$15.669.992.552	\$1.566.999.255	\$14.102.993.297	\$3.767.291.654
12	\$85.357.108.187	\$68.826.915.170		\$73.048.417		\$16.457.144.600	\$1.645.714.460	\$14.811.430.140	\$3.509.121.358
13	\$89.624.963.597	\$72.268.260.929		\$73.048.417		\$17.283.654.251	\$1.728.365.425	\$15.555.288.826	\$3.268.608.624
14	\$94.106.211.776	\$75.881.673.975		\$73.048.417		\$18.151.489.384	\$1.815.148.938	\$16.336.340.446	\$3.044.549.698
15	\$98.811.522.365	\$79.675.757.674		\$73.048.417		\$19.062.716.274	\$1.906.271.627	\$17.156.444.647	\$2.835.822.442
16	\$103.752.098.483	\$83.659.545.558		\$54.296.262		\$20.038.256.663	\$2.003.825.666	\$18.034.430.997	\$2.643.855.017
17	\$108.939.703.408	\$87.842.522.836		\$54.296.262		\$21.042.884.310	\$2.104.288.431	\$18.938.595.879	\$2.462.444.311
18	\$114.386.688.578	\$92.234.648.978		\$54.296.262		\$22.097.743.338	\$2.209.774.334	\$19.887.969.004	\$2.293.467.153
19	\$120.106.023.007	\$96.846.381.426		\$54.296.262		\$23.205.345.318	\$2.320.534.532	\$20.884.810.786	\$2.136.072.970
20	\$126.111.324.157	\$101.688.700.498		\$54.296.262		\$24.368.327.397	\$2.436.832.740	\$21.931.494.658	\$1.989.469.197
21	\$132.416.890.365	\$106.773.135.523				\$25.643.754.842	\$2.564.375.484	\$23.079.379.358	\$1.856.848.898
22	\$139.037.734.883	\$112.111.792.299				\$26.925.942.584	\$2.692.594.258	\$24.233.348.326	\$1.729.216.268
23	\$145.989.621.627	\$117.717.381.914				\$28.272.239.714	\$2.827.223.971	\$25.445.015.742	\$1.610.356.614
24	\$153.289.102.709	\$123.603.251.009				\$29.685.851.699	\$2.968.585.170	\$26.717.266.529	\$1.499.666.913

25	\$160.953.557.844	\$129.783.413.560				\$31.170.144.284	\$3.117.014.428	\$28.053.129.856	\$1.396.585.595
26	\$169.001.235.736	\$136.272.584.238				\$32.728.651.499	\$3.272.865.150	\$29.455.786.349	\$1.300.589.690
27	\$177.451.297.523	\$143.086.213.450				\$34.365.084.073	\$3.436.508.407	\$30.928.575.666	\$1.211.192.172
28	\$186.323.862.399	\$150.240.524.122				\$36.083.338.277	\$3.608.333.828	\$32.475.004.449	\$1.127.939.495
29	\$195.640.055.519	\$157.752.550.328				\$37.887.505.191	\$3.788.750.519	\$34.098.754.672	\$1.050.409.286
30	\$205.422.058.295	\$165.640.177.845				\$39.781.880.451	\$3.978.188.045	\$35.803.692.406	\$978.208.204
VPN									\$26.270.309.111
TIR									17%

Tabla 22. Flujo de caja VPN y TIR (COP)

Fuente: Autores

Flujo de Caja Neto

El flujo de caja neto positivo de **\$35.803.692.406 COP** es una señal clara de que la planta de aprovechamiento de residuos orgánicos está generando ingresos suficientes no solo para cubrir todos sus costos operativos, de capital y depreciación, sino también para proporcionar un retorno significativo sobre la inversión. Este flujo de caja positivo indica que la planta es rentable, lo que es crucial para asegurar su viabilidad a largo plazo. Además, este monto refleja la ganancia total obtenida bajo la premisa de que toda la producción de metano comprimido y Biol es vendida, lo cual sugiere que la planta está maximizando el aprovechamiento de los residuos orgánicos procesados. La venta de estos productos no solo cubre los costos asociados con la operación de la planta, sino que también genera un excedente considerable, lo que puede ser reinvertido en mejoras tecnológicas, expansión de la capacidad o incluso en iniciativas de sostenibilidad.

VPN

Un Valor Presente Neto (VPN) positivo de **\$26.270.309.111 COP** indica que la planta de aprovechamiento de residuos orgánicos es económicamente viable y generará valor a lo largo del tiempo. Después de descontar todos los flujos de caja futuros a la tasa de descuento del 12,75%, los ingresos proyectados superan los costos asociados, incluyendo la inversión inicial y los gastos operativos. Lo que da a entender que la planta no solo cubrirá sus costos, sino que también generará un retorno adicional sobre la inversión, lo que la convierte en una opción atractiva para los inversores.

TIR

Una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 17% es significativa porque refleja la eficiencia con la que la planta convierte su inversión inicial en beneficios. Este porcentaje indica que, por cada peso invertido en el proyecto, se espera un retorno anual del 17%, lo que es una señal de que la inversión es sólida y capaz de generar ganancias que justifican el riesgo asumido.

Tiempo de retorno

Es de ocho años y dos meses es un tiempo de retorno de la inversión muy bueno, el período de recuperación indica que, a pesar de los altos gastos iniciales, el proyecto tiene la capacidad de generar flujos de caja constantes que permitirán recuperar la inversión dentro de una década, pero para obtener este tiempo de retorno la meta de ventas deberá ser del 70%.

6.4.2 Sistema de Biodigestor Familiar.

Cuando se habla de un biodigestor familiar se refiere a un sistema pequeño diseñado para tratar los residuos orgánicos producidos en un hogar. Para este caso es un sistema diseñado específicamente para aprovechar los residuos orgánicos generados en una propiedad rural, como estiércol de animales, restos de cultivos y otros desechos orgánicos. Al igual que en un hogar, estos residuos se introducen en un contenedor hermético donde, gracias a la acción de bacterias, se descomponen y producen biogás y Biol.

A.) Instalación

Propuesta 1.

En la tabla siguiente se presenta los costos por instalación que contiene las variables para un sistema de digestión anaeróbica familiar:

- Autores que corresponde a los honorarios del equipo de trabajo que presenta esta propuesta (Jeison Andres Mejia y Dagoberto Guerrero).
- Proyectos a Tierra que corresponde al equipo de profesionales encargados de la herramienta necesaria para la instalación del biodigestor como tubería, bomba, trituradora, filtros, y todos los elementos necesarios desde el inicio hasta la finalización del proyecto; además se incluye la mano de obra por concepto de excavación y nivelación de terreno.

Los valores que se presentan fueron indagados en costo actualizado teniendo contacto directo con la empresa Proyectos a Tierra arrojando un total de **\$36.487.000 COP** por concepto de instalación.

Costos de Instalación				
Soporte documental/propuesta Empresa	Biodigestor familiar	Observaciones	Costos Directos de Implementación (COP)	IVA
Autores	Diseño y Dimensionamiento	Diseño y dimensionamiento del todo el sistema para la implementación	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000
Proyectos a Tierra	Biodigestor	12 metros de largo 1,5 diámetro mangas de 6" GEOMEMBRANA 1000MM	\$ 27.300.000	\$ 32.487.000
Proyectos a Tierra	Excavación y nivelación del terreno	Si el terreno no es apto la obra civil de muros correrá por parte del contratante		
Proyectos a Tierra	Embudo	Para el ingreso de material 8"		
Proyectos a Tierra	Tanque de salida	De 1 m ³ en concreto para extracción de Biol		
Proyectos a Tierra	Bomba de 1 hp	Para aguas negras a 110v para agitación, descarga y mantenimiento del sistema (no incluye punto eléctrico)		
Proyectos a Tierra	Trituradora de residuos orgánicos	Penagos pR14 a gasolina		
Proyectos a Tierra	Poster	Instrucciones, guía de instalación		
Proyectos a Tierra	Geotextil	Para cobertura en la fosa		
Proyectos a Tierra	Manguera	100 metros 1 "línea de biogás		
Proyectos a Tierra	Estufa de 4 puestos	de mesa para biogás		
Proyectos a Tierra	Acoples			
Proyectos a Tierra	Válvula de alivio biogás			
Proyectos a Tierra	Filtro de sulfitos Y dos cargas de filtros			
Proyectos a Tierra	Malla ara válvulas y filtros			
Total				\$ 36.487.000

Tabla 23. Propuesta 1 Biodigestor familiar

Fuente: Tomada de propuesta económica proyectos a tierra, Adaptada por autores [93].

Propuesta 2.

Para la instalación se tiene en cuenta las mismas variables, pero con diferentes ejecutantes o empresas quienes presentan la propuesta número 2 para la instalación de este biodigestor familiar, además de aspectos diferenciales como que el cliente debe realizar las adecuaciones locales para la instalación del biodigestor y la protección necesaria que fueron valoradas en esta propuesta (estructura, tejas, adecuación de terreno, zanja, etc).

Esta propuesta tiene un costo total de **\$ 29.856.000 COP.**

Costos de Instalación				
Soporte documental/ propuesta Empresa	Biodigestor familiar	Observaciones	Costos Directos de implementación (COP)	Imagen de Referencia
Autores	Diseño y Dimensionamiento	Diseño y dimensionamiento del todo el sistema para la implementación	\$ 4.000.000	N/A
Soluciones Dinámicas Integrales SDI	Trituradora 14hp/Gasolina	Necesaria para reducir menor tamaño la biomasa y mejorar el proceso anaeróbico	\$12.900.000	
Sistema.bio	Transporte Equipos	Costo necesario para el transporte de los equipos como el biodigestor, tejas, trituradora, estructura metálica, tubería, etc.	\$ 1.500.000	N/A
Homecenter	Infraestructura protectora	Infraestructura metálica que sirve para proteger el biodigestor en caso de necesitarlo, además de la moto bomba (incluye Angulo cuadrado, tejas metálicas, tornillería e instalación)	\$ 800.000	

Mano de obra local	Zanja biodigestor y mezclador	Lugar donde se ubica el biodigestor	\$ 500.000	
Mano de obra local	Obra civil	adecuación zanja, impermeabilización, bolsas de tierra, etc.	\$ 700.000	
Sistema.bio	Biodigestor	Incluye el mezclador, el filtro, y la tubería	\$ 5.900.000	
Homecenter	Motobomba	Motobomba para regar el Biol--- Especificaciones principales •Potencia: 5.5 HP •Presión Máxima: 2.8 Bar •Profundidad máxima de aspiración: 47.7 m •Diámetro: 2 pulgadas	\$900.000	
Sistema.bio	Mano de obra	Mano de obra utilizada para realizar el proyecto incluida con la empresa sistema.bio	\$1.250.000	
			Total	\$ 29.856.000

Tabla 24. Propuesta 2 Biodigestor Familiar

Fuente: Tomada de propuestas económicas Sistema. Bio [114], Homecenter [115], Soluciones Dinámicas Integrales SDI [116], Adaptada por autores.

B.) Instalación de Gas Natural

En la siguiente tabla se presenta el costo total de la instalación del servicio de gas natural en el municipio de mesitas contemplado para el año 2024 por residencia y/o finca. Valor cotizado por la empresa VANTI SA ESP.

Gas Natural				
Soporte documental / propuesta Empresa	Gas Natural	Observaciones	Costos (COP)	Costos 30 años (COP)
Vanti SA ESP	Instalación	Incluye el medidor, acometida, y certificado de conformidad	\$ 884.283	\$ 884.283

Tabla 25. Valor Instalación Gas Natural

Fuente: Tomada de valores de cargos de conexión de Vanti SA ES [117].

C.) Costos Biodigestor 30 años

Para el sistema familiar los costos de mantenimiento del biodigestor la mano de obra de mantenimiento mensual no se verá reflejado en gasto adicional debido a que la persona encargada de la finca recibiría capacitación para el trituramiento de los residuos, y la limpieza que conlleva el biodigestor teniendo como estimación los siguientes valores.

Costos de Mantenimiento (30 años)					
Ejecutante	Biodigestor familiar	Observaciones	Costos mensuales	Costos anuales	Costos 30 años
Beneficiario	Materia prima	Materia prima a partir de los residuos del banano	\$ -	\$ -	\$ -
Beneficiario	Mano de obra	Incluye el traslado del material a la trituradora y la trituración	\$ -	\$ -	\$ -
Beneficiario	Daños en la tubería o membrana	Contemplado 1 imprevisto cada 5 años (con un incremento del valor anual del 5%)	\$ -	\$ 500.000	\$ 7.307.476

Beneficiario	Filtro sistema Biogás	1 cada 3 años (con un incremento del valor anual del 5%)	\$ -	\$ 200.000	\$ 4.647.031
Beneficiario	Gasolina Trituradora	4 galones Mensuales (con un incremento del valor anual del 5%)	\$ 63.444	\$ 761.328	\$ 50.581.755
				Total	\$ 62.536.262

Tabla 26. Costos Mantenimiento 30 años biodigestor

Fuente: Autores

D.) Costos Gas Natural a 30 años

Son costos con aproximaciones teniendo en cuenta 2 factores, el primero es el servicio mensual que de acuerdo con la información que suministra Vanti SA ESP de 105 m^3 de consumo promedio por familiar en mesitas del colegio y el valor en su página de la revisión quinquenal, teniendo en cuenta un aumento anual del 5% [4].

Gas Natural				
Soporte documental / propuesta Empresa	Gas Natural	Observaciones	Costos (COP)	Costos 30 años (COP)
Vanti SA ESP	Servicio anual	Cálculo realizado de acuerdo con el promedio del año 2022 de 105 m^3 mensuales, con el valor de la tarifa con subsidio y un promedio de 1.286 x m^3 con aumento del 5% anual	\$ 1.620.360	\$ 107.654.851
Vanti SA ESP	Revisión periódica cada 5 años	Revisión obligatoria 5 años incluyendo 5% de aumento anual para 30 años (6 veces)	\$ 82.000	\$ 1.198.426
			Total	\$ 108.853.277

Tabla 27. Costos Gas Natural a 30 años

Fuente: Vanti SA ESP Adaptada por Autores [118]

Propuestas	Instalación	Costos Mantenimiento 30 años	Pago factura Mensual (valor proyecto a 30 años)	Total
Propuesta 1	\$ 36.487.000	\$ 62.536.262	\$ -	\$ 99.023.262
Propuesta 2	\$ 29.856.000	\$ 62.536.262	\$ -	\$ 92.392.262
Propuesta Gas Natural	\$ 884.283	\$ -	\$ 108.853.277	\$ 109.737.560

Tabla 28. Costos totales

Fuente: Autores

Para la implementación del biodigestor familiar se indago con dos empresas que son expertas en la implementación de biodigestores, como resultado la propuesta numero dos presenta **\$ 6.631.000** pesos por debajo del costo de la propuesta número uno, por lo que, para el análisis de este proyecto, se tomara en cuenta el valor de la propuesta número dos ya que es más rentable para el dueño del predio familiar.

Teniendo en cuenta que el Biol va a ser utilizado para la mejora de calidad de la cosecha, se debe considerar la alternativa de la venta de Biol determinada de la siguiente manera: el biodigestor necesita 21.575 lt al año teniendo en cuenta este valor existen tres escenarios para la producción de Biol (optimista, conservador, negativo), en atención a los factores principales que afectan la producción final de Biol: a) pérdidas por evaporación (6-8 % en climas cálidos) [110]; b) retención en sólidos (20-25% del líquido queda atrapado en la fibra de los residuos del banano) [111]; c) filtrado (5-10% según el método usado) [112]. Obteniendo los siguientes tres escenarios:

Escenario	Evaporación	Retención en Sólidos	Pérdidas por Filtrado	Biol Neto (L/año)	Eficiencia
Negativo	8%	25%	10%	12.395 L	57%
Conservador	7%	22%	7%	13.812 L	64%
Optimista	6%	20%	5%	14.901 L	69%

Tabla 29 Producción de Biol anual

Fuente: Autores

Para mejorar la producción de la cosecha se utilizará el 65% para venta, con el escenario conservador tendría 9.000 lt anuales para venta, con un valor de \$ 38.000 pesos, lo que equivale a un ingreso de **\$85.500.000 COP** anuales.

Se debe tener en cuenta que para la venta de Biol se necesita un capital humano con un salario estimado de **22.842.693 COP** anual, suministrando todas las prestaciones sociales (ver tabla 14 liquidación personal 2024). La materia prima para este caso son 21.575 lt anuales, que de acuerdo con las tarifas establecidas en mesitas y aplicando un descuento del 45% de subsidio genera un valor de **\$ 466.957 COP anuales**. El costo del envase donde se va a almacenar con su etiqueta y su distribución es de **\$67.500.000 COP**, y unos gastos de imprevistos de **\$50 COP** anuales por litro de Biol. Los resultados se detallan a continuación:

Costos anuales de operación	
Ítem	Valor
Materia Prima Agua	\$ 466.957
Personal	\$ 22.841.694
Envase, etiquetado y distribución	\$ 67.500.000
Imprevistos	\$ 1.078.767
Total	\$ 91.887.418

Tabla 30. Costos anuales venta de Biol

Fuente: Autores

Año (n)	Ingresos (I) Aumento 5%	Costos (C) Aumento 5%	Flujo Caja Neto (I - C)	Valor Presente Neto (VPN)
0	0	0	-\$ 29.856.000	
1	\$ -	\$ 91.887.418	-\$ 121.743.418	-\$ 107.976.424
2	\$ 112.500.000	\$ 96.481.789	\$ 16.018.211	\$ 12.600.301
3	\$ 118.125.000	\$ 101.305.879	\$ 16.819.121	\$ 11.734.205
4	\$ 124.031.250	\$ 106.371.173	\$ 17.660.077	\$ 10.927.641
5	\$ 130.232.813	\$ 111.689.731	\$ 18.543.081	\$ 10.176.517
6	\$ 136.744.453	\$ 117.274.218	\$ 19.470.235	\$ 9.477.022
7	\$ 143.581.676	\$ 123.137.929	\$ 20.443.747	\$ 8.825.608
8	\$ 150.760.760	\$ 129.294.825	\$ 21.465.935	\$ 8.218.970

9	\$ 158.298.798	\$ 135.759.566	\$ 22.539.231	\$ 7.654.030
10	\$ 166.213.737	\$ 142.547.545	\$ 23.666.193	\$ 7.127.921
11	\$ 174.524.424	\$ 149.674.922	\$ 24.849.502	\$ 6.637.975
12	\$ 183.250.646	\$ 157.158.668	\$ 26.091.978	\$ 6.181.707
13	\$ 192.413.178	\$ 165.016.601	\$ 27.396.576	\$ 5.756.800
14	\$ 202.033.837	\$ 173.267.431	\$ 28.766.405	\$ 5.361.100
15	\$ 212.135.529	\$ 181.930.803	\$ 30.204.726	\$ 4.992.598
16	\$ 222.742.305	\$ 191.027.343	\$ 31.714.962	\$ 4.649.426
17	\$ 233.879.420	\$ 200.578.710	\$ 33.300.710	\$ 4.329.843
18	\$ 245.573.391	\$ 210.607.646	\$ 34.965.745	\$ 4.032.226
19	\$ 257.852.061	\$ 221.138.028	\$ 36.714.033	\$ 3.755.066
20	\$ 270.744.664	\$ 232.194.930	\$ 38.549.734	\$ 3.496.958
21	\$ 284.281.897	\$ 243.804.676	\$ 40.477.221	\$ 3.256.590
22	\$ 298.495.992	\$ 255.994.910	\$ 42.501.082	\$ 3.032.745
23	\$ 313.420.791	\$ 268.794.655	\$ 44.626.136	\$ 2.824.286
24	\$ 329.091.831	\$ 282.234.388	\$ 46.857.443	\$ 2.630.155
25	\$ 345.546.423	\$ 296.346.107	\$ 49.200.315	\$ 2.449.368
26	\$ 362.823.744	\$ 311.163.413	\$ 51.660.331	\$ 2.281.008
27	\$ 380.964.931	\$ 326.721.583	\$ 54.243.347	\$ 2.124.221
28	\$ 400.013.177	\$ 343.057.663	\$ 56.955.515	\$ 1.978.210
29	\$ 420.013.836	\$ 360.210.546	\$ 59.803.291	\$ 1.842.235
30	\$ 441.014.528	\$ 378.221.073	\$ 62.793.455	\$ 1.715.607
VPN				\$ 22.237.915
TIR				14%

Tabla 31. Flujo de Caja VPN y TIR Biodigestor familiar

Fuente: Autores

Flujo de Caja Neto:

El flujo de caja neto de **\$62.793.455 COP** es una señal clara de que el proyecto del biodigestor generará ingresos suficientes para cubrir los costos operativos y aún dejará un excedente significativo. El flujo de caja positivo demuestra que el proyecto es viable y que ofrece una fuente estable de ingresos adicionales a lo largo del tiempo.

Valor Presente Neto (VPN):

Un VPN de **\$22.237.915 COP** indica que, después de descontar todos los costos y gastos futuros a una tasa específica del 10%, el proyecto generará un valor adicional significativo. La instalación del biodigestor no solo se paga sola, sino que también crea un ahorro considerable que la familia puede utilizar para otros fines, como educación, salud o mejoras en el hogar.

Tasa Interna de Retorno (TIR): La TIR del 14% es un indicador positivo muestra que la inversión en el biodigestor genera un retorno anual del 14%, lo que es significativamente mayor que muchas otras formas de inversión disponibles.

Tiempo de retorno:

Teniendo en cuenta los resultados anteriores el proyecto es viable, no solo se recupera la inversión en un poco más de 9 años si no que también en comparación con los gastos de tener servicio de gas natural en 30 años se tiene una diferencia positiva de **\$ 10.714.297 COP**.

Autoconsumo y venta de Biogás (Fincas 5h): Si bien, el biodigestor está diseñado para suplir el consumo de gas doméstico, también se puede adaptar como calentador de agua, sopletes y calentadores agrícolas. Debido a que el biodigestor es capaz de generar biogás para abastecer hasta 20 usuarios diarios se plantea utilizar tubería flexible compuesta, la cual ha surgido como una alternativa técnica y financieramente competitiva en últimos años. Estas tecnologías presentadas por **SoluForce** (tuberías flexibles de alta presión) y **Morken Group** (sistemas flexibles para hidrocarburos y aguas residuales), destacan sus diferencias en diseño, rendimiento y economía [119] [120].

La tubería está compuesta por: a) **Capa interna:** Polímeros resistentes a químicos (HDPE, PVDF, Nylon) para evitar corrosión; b) **Refuerzo:** Fibras de aramida, carbono o vidrio, que proporcionan resistencia a la presión; c) **Capa externa:** Protección UV y abrasión

(poliuretano, HDPE). Además, no requiere recubrimientos anticorrosivos, ya que los materiales base son inertes a la mayoría de los hidrocarburos y fluidos agresivos (H_2S , CO_2 , salmuera) [119] [120]. En contraste, la tubería metálica posee materiales en acero al carbono (con recubrimientos epóxicos o de polietileno), acero inoxidable (para corrosión severa) o aleaciones (Inconel, duplex), lo que presenta problemas como la corrosión la cual requiere protección catódica, inhibidores químicos o revestimientos, incrementando costos [119] [120].

A continuación, la tabla 32 resume y compara el rango de presión y temperatura de la tubería flexible y la tubería metálica.

Parámetro	Tubería Flexible	Tubería Metálica
Rango de presión	Hasta 1,500 psi (SoluForce)	Más de 5,000 psi (dependiendo del grado)
Rango de temperatura	-40°C a +120°C (algunas hasta +180°C)	-50°C a +500°C (aleaciones especiales)
Notas	Limitada en alta presión/temperatura	Ideal para condiciones extremas (ej: vapor, fluidos hiperbáricos)

Tabla 32. Comparación rango de presión y temperatura

Fuente: Soluforce y Morken Group y adaptada por autores [119] [120].

La tubería metálica sigue siendo superior en aplicaciones de alta presión/temperatura, pero la flexible gana en entornos corrosivos o moderados. En cuanto a la instalación y logística de transporte la tubería flexible tiene ventajas como peso reducido (70% menos que el acero) el cual facilita transporte en zonas remotas (selvas, plataformas offshore) y no requiere grúas pesadas en la instalación. De igual forma, la tubería flexible como el mismo nombre lo indica tiene **flexibilidad geométrica la cual puede enrollarse y desplegarse rápidamente**, adaptándose a curvas sin juntas, y la última ventaja es el **tiempo de instalación 50–70% menor al eliminar soldaduras en campo** (puntos críticos de falla en tubería metálica) y las conexiones con sistemas de acoplamiento rápido.

En cuanto a Durabilidad y mantenimiento se tiene la siguiente tabla comparativa:

Aspecto	Tubería Flexible	Tubería Metálica
Vida útil	20–50 años (sin corrosión)	15–30 años (depende de mantenimiento)
Inspección	Menor frecuencia (no sufre corrosión)	Requiere ultrasonido, radiografía, monitoreo de espesor
Costos de mantenimiento	Casi nulos (solo revisión de juntas)	Alto (revestimientos, protección catódica, reparación de grietas)

Tabla 33. Durabilidad y Mantenimiento

Fuente: Soluforce y Morken Group y adaptada por autores [119] [120].

Finalmente, se tienen ahorros económicos al utilizar esta tubería flexible que incluyen la reducción del 30–50% en costos de instalación (menor mano de obra, logística y equipos), un ahorro del 20–40% en mantenimiento (sin corrosión, menos paradas técnicas) y mayor vida útil: Retorno de inversión (ROI) más rápido en proyectos a mediano plazo [119] [120].

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

El estudio de los cultivos en Mesitas Del Colegio reveló el potencial de generación de biogás a partir de los residuos generados en la post cosecha del banano donde la cantidad significativa de producción anual representa el 10.8% (1795 t) de la producción del municipio, de esto los residuos aprovechables que este genera son entre el 35-55% de subproducto lo que sugiere un potencial importante para aprovechar los residuos generados por estos cultivos. Además, características físicas y químicas de estos cultivos, contribuye a la planificación eficaz del aprovechamiento de sus residuos post cosecha.

Al realizar el aprovechamiento de los residuos del banano del municipio se produce el 23% del metano consumido por el municipio en el año 2022, para abastecer a 992 usuarios. Las fincas productoras de 5 ha tienen un potencial de producción de biogás capaz de abastecer a 20 usuarios diariamente y 13 usuarios si fueran abastecidos con metano. La utilización de toda la biomasa en el proceso anaeróbico generara sobreproducción de biogás, el cual podría no ser aprovechado, por esto solo se realizó el aprovechamiento del raquis, siendo el residuo con mayor generación de biogás, logrando abastecer a 9 familias al día.

En la selección de las plantas de biodigestión se contemplaron factores como: acceso a la zona, presupuesto, mantenimiento del sistema, materia orgánica y tiempo de uso, estos puntos son clave al diseñar y escoger el tipo de biodigestor para un proyecto de generación de biogás. Para estos factores los biodigestores de membranas plásticas (familiares y laguna cubierta) son la mejor opción. Al dimensionar los dos sistemas de digestión anaerobia la variable de carga orgánica diaria es la principal influyente en la diferencia de dimensiones de los digestores, el TRH y densidad de la materia son iguales en los dos escenarios. La disposición de materia orgánica a procesar determina el volumen liquido de un digestor.

La viabilidad técnica y económica de los estudios indica que la planta de aprovechamiento de residuos municipal cumple con los requerimientos mínimos necesarios para poder

operar, y representa una excelente oportunidad de desarrollo para la comunidad local y sus familias donde se resalta del proyecto las siguientes variables estimadas:

- A. **Producción de biogás:** se producirá 154.171,5 m³ de biogás al año para abastecer a los usuarios que no cuentan el servicio de gas natural del municipio de Mesitas, y se contará con una disponibilidad de reserva para atender cualquier evento no contemplado.
- B. **Producción de Biol:** se producirá y venderá aproximadamente 7.431.079 litros al año de Biol aprovechando la alta demanda en el mercado durante los últimos años.
- C. **Impacto ambiental:** Durante el proceso de generación de biogás, los residuos orgánicos generados en la cosecha y post cosecha del banano son aprovechados, lo que permitirá disminuir la cantidad de residuos enviados a los rellenos sanitarios. Esto permite reducir el impacto ambiental asociado al uso de combustibles fósiles como gas natural y alineándonos al plan estratégico de sustitución de leña, fomentando el uso de biometanos.

Con la instalación de esta planta, el municipio de Mesitas puede beneficiarse de una reducción significativa de residuos agrícolas y orgánicos, lo cual contribuye a la mejora ambiental de la región, al control de emisiones de gases de efecto invernadero y al fortalecimiento de la seguridad energética a nivel local. Esto es un paso alineado con los objetivos de la transición energética a nivel nacional.

Por otra parte, el proyecto contempla una alternativa para las familias productoras de banano en donde con la aplicación de este proyecto tendrán un suministro alternativo de gas que es utilizado para calefacción de los animales, mejorar su producción, se genera aproximadamente 2.147,22 m³ que son capaces de abastecer perfectamente a 20 usuarios

durante todo el año y con capacidad de suministrar biogás a fincas aledañas, además de los beneficios ambientales que este tipo de proyectos trae en su implementación.

Para una familia interesada en invertir en este proyecto, los beneficios se manifiestan en tener una alternativa de gas constante sus necesidades energéticas diarias, lo cual representa un ahorro significativo en el consumo de combustibles fósiles o leña, además de mejorar las condiciones de vida. A nivel financiero, se genera ingresos adicionales mediante la venta de Biol, un recurso valorado en el mercado agrícola que potencia nuevas líneas de negocio a nivel local y la venta de biogás, apoyando la economía circular y contribuye al desarrollo de la agricultura sostenible. La planta se convierte en un modelo de emprendimiento local que puede ser replicado en otras familias del municipio.

Esta solución que se presenta en el proyecto al implementarse en el municipio de Mesitas del Colegio, es una opción clave que emerge para diversificar las fuentes de energía en el país a través del biogás, especialmente en zonas rurales. Su implementación en el municipio fomentará el desarrollo económico, generará empleos y contribuirá a la sostenibilidad ambiental, respondiendo eficazmente a la necesidad de fuentes de energía limpias y resilientes en el país.

BIBIOGRAFÍA

- [1] NATURGAS, «Naturgas.com,» 19 07 2021. [En línea]. Available: <https://naturgas.com.co/que-es-el-biogas/#:~:text=El%20potencial%20de%20producci%C3%B3n%20de,mil%20metros%20c%C3%BAbicos%20por%20hora..>
- [2] ASEÍ, «grupoasei.co,» [En línea]. Available: <https://www.grupoasei.co/etapas-de-la-gestion-integral-de-residuos-solidos-y-sus-beneficios>.
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «upme.gov.com,» enero 2024. [En línea]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Proyecciones_de_Demanda_Final_v_31_01_2024.pdf. [Último acceso: 22 Febrero 2025].
- [4] Ministerio de Minas y Energía, «GOV.co,» [En línea]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/estad%C3%ADsticas-gas-combustible/>. [Último acceso: 1 Abril 2024].
- [5] S. ú. d. i. d. s. p. d. SUI, «SUI,» 2023. [En línea]. Available: https://sui.superservicios.gov.co/Reportes/Filtro?field_sspd_sui_reporte_entidad_value=4&field_sspd_sui_reporte_categoria_value=0. [Último acceso: 9 Agosto 2024].
- [6] M. d. m. y. energias, «Minenergias,» [En línea]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/biog%C3%A1s-y-biometano/>. [Último acceso: 07 2024].
- [7] M. d. M. y. Energias, «Ministerio de Minas y Energias,» [En línea]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/biog%C3%A1s-y-biometano/>. [Último acceso: 10 2024].
- [8] Intagri, «Intagri,» [En línea]. Available: <https://www.intagri.com/articulos/agricultura-organica/biofertilizantes-en-agricultura#:~:text=Los%20biofertilizantes%20son%20insumos%20formulados,de%20nutrientes%20para%20las%20plantas.> . [Último acceso: 07 2024].
- [9] E. Tiempo, «El Tiempo,» [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/colombia-empieza-a-fortalecer-su-apuesta-por-la-produccion-de-biogas-y-biometano-788261>. [Último acceso: 10 2024].
- [10] N. Unidas, «Naciones Unidas,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>. [Último acceso: 2 10 2024].
- [11] Energía y clima mundial - Anuario estadístico 2024, «Enerdata,» [En línea]. Available: <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>. [Último acceso: 6 Noviembre 2024].
- [12] I. E. AGENCY, WorldEnergyOutlook2023, 2023, p. 30.
- [13] Minambiente, «archivo.minambiente.gov.co,» [En línea]. Available: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2150-sector->

- petrolero-lanza-guia-estrategica-para-reduccion-de-emisiones-por-metano.
[Último acceso: 22 Febrero 2025].
- [14] Clean air task force, «Clean air task force,» [En línea]. Available: <https://www.catf.us/es/programa-mitigacion/>. [Último acceso: 22 Febrero 2025].
- [15] INNOVA NIKASAWA, «¿Cómo Podrá la Industria del Petróleo superar los Desafíos de la Descarbonización?,» 16 08 2021.
- [16] Ecopetrol, «Ecopetrol,» Ecopetro, [En línea]. Available: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/comunicado-gas-termicas>. [Último acceso: 02 2025].
- [17] J. A. Roca, «El periodico de la energia,» 16 07 2024. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/el-fin-del-transito-de-gas-por-ucrania-prepara-el-terreno-para-el-gnl-y-los-gasoductos/>. [Último acceso: 07 2024].
- [18] Council, Climate, «WHY IS GAS BAD FOR CLIMATE CHANGE AND ENERGY PRICES?,» 30 06 2020.
- [19] Ministerio de Minas y Energía, Agencia Nacional de Hidrocarburos, «Agencia Nacional de Hidrocarburos,» [En línea]. Available: <https://www.anh.gov.co/es/noticias/informe-anual-de-reservas-y-recursos-irr-2023/>. [Último acceso: 23 febrero 2025].
- [20] Sergio Córdoba Rojas y Katherine Casas Pérez, «ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y ECONÓMICO DEL GAS NATURAL Y SU PERTINENCIA EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN COLOMBIA,» *Crudo Transparente*, 17 04 2024.
- [21] D. M. G. Castro, «Naturgas,» 24 07 2024. [En línea]. Available: <https://naturgas.com.co/oferta-de-gas-local-se-debe-complementar-con-fuentes-externas-para-cubrir-la-demanda-en-2025-y-2026-advierte-naturgas/>. [Último acceso: 07 2024].
- [22] Yepes, «Universidad de Ibagué,» [En línea]. Available: <https://www.unibague.edu.co/noticias-institucionales/4549-el-biogas-es-esperanza-para-la-transicion-energetica-justa>. [Último acceso: 10 2024].
- [23] El Tiempo, «ElTiempo.com,» El Tiempo, 26 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/mas-de-90-vias-afectadas-por-lluvias-en-el-departamento-de-cundinamarca-667886>. [Último acceso: 22 Julio 2024].
- [24] Ministerio de Minas y Energía, «upme.gov.co,» Noviembre 2022. [En línea]. Available: https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Eliminados/Tomo_II_Enfoque_territorial_dic2_obsoleto.pdf. [Último acceso: 22 Febrero 2025].
- [25] Capital, «canalcapital.gov.co,» Noticias Capital, 3 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.canalcapital.gov.co/noticias-capital-migracion/estos-son-los-problemas-salud-alrededor-del-relleno-sanitario-dona-juana>. [Último acceso: 22 Julio 2024].

- [26] Dirección de Censos y Demografía, DANE., «Censo Nacional de Población y Vivienda 2019,» DANE, Bogota, 2019.
- [27] Alcaldía de mesitas del colegio, «Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) – Municipio de El Colegio,» 2018.
- [28] Ministerio de Agricultura, «Agronet Minagricultura,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>.
- [29] L. V. Peñaranda Gonzalez, S. P. Montenegro Gómez y P. A. Giraldo Abad, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia,» *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. VIII, n° 2, ISSN 2145-6097, 2017.
- [30] Ministerio de Minas y Energía, «UPME,» Noviembre 2022. [En línea]. Available: https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Eliminados/Tomo_II_Enfoque_territorial_dic2_obsoleto.pdf. [Último acceso: 24 Febrero 2025].
- [31] BESEL, S.A., «Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. España.,» Octubre 2007. [En línea]. Available: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf. [Último acceso: 5 Agosto 2024].
- [32] J. E. Carrasco Garcia, «Combustión directa de la biomasa,» *Master en energías renovables y Mercado energético 2007/2008 EOI-Escuela de negocios*, pp. 5-30, 2008.
- [33] Repsol, «Repsol,» [En línea]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biomasa/index.cshhtml>. [Último acceso: 15 Julio 2024].
- [34] Repsol, «Repsol,» [En línea]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biomasa/index.cshhtml>. [Último acceso: 22 Noviembre 2023].
- [35] Agència de Residus de Catalunya, «GENCAT,» Agència de Residus de Catalunya, 9 Octubre 2009. [En línea]. Available: https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/digestio_anaerobia/. [Último acceso: 11 Noviembre 2023].
- [36] Genia Bioenergy, «El digestato: del residuo al recurso agrícola,» Genia Bioenergy, 2018. [En línea]. Available: <https://geniabioenergy.com/digestato-del-residuo-al-recurso-agricola/>. [Último acceso: 2 Octubre 2024].
- [37] Antoni Sánchez Ferrer, Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, , «Universitat Autònoma de Barcelona,» Valorisation of digestate from biowaste through solid-state fermentation to obtain value added bioproducts: A first approach, 23 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/el-digestato-de-residuo-a-recurso-en-un-paradigma-descentralizado->

- 1345680342040.html?noticiaid=1345777050813. [Último acceso: 2 Octubre 2024].
- [38] A. M. González Cabrera, «Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia,» *Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental*, p. 99, 2014.
 - [39] R. M. Leon Cifuentes, «Diseño, calculos y evalucion de biogestores.,» *Corporación Universitaria Autónoma de Occidente. División de Ingenierías*, 1991, pp. 28-80, 1991.
 - [40] Z. Sidartha Roa, J. C. Mendoza Corba, S. S. González Muñoz, F. L. Kaiser Caldera y A. Gebauer, «Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia,» *Programa de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social empresarial*, n° 978-958-52236-2-2, pp. 3-100, 2020.
 - [41] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias - ODEPA Chile, «Estudio para la evaluación socioeconómica y ambiental de tres prototipos de biodigestores en predios de pequeños productores lecheros,» Marzo 2009. [En línea]. Available: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2009/03/EstudioBiodigestores.pdf>. [Último acceso: 23 Julio 2024].
 - [42] C. M. Martínez Hernández, L. Méndez Gómez y J. Flores Ruiz, «Análisis de tensiones Von Mises en biodigestores anerobios de cúpula rígida,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 27, n° No. 2, ISSN: 2071-0054, 2018.
 - [43] W. J. O. Arrieta Palacios, «DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DOMÉSTICO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL ESTIÉRCOL DE GANADO,» *UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA*, pp. 23-240, 2016.
 - [44] C. L, V. Savran, B. D, D. p. Diaz M.R., S. J y P. A, «Production of biogas and biofertilizers from biodigester effluents,» *Pastos y Forrajes*, vol. 35, n° Vol. 35, ISSN 0864-0394 , 2012.
 - [45] H. D. Macas Gaona, «El proceso de enseñanza aprendizaje para la construcción la finca la Maravilla en la provincia de sucumbios cantón Gonzalo Pizarro.,» *Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicada.*, pp. 40-50, 2018.
 - [46] W. Pérz Barroseta, «El proceso de enseñanza aprendizaje para la contrucción de biodigestores.,» *Facultad de Ciencias Tecnologías y Económicas.*, pp. 23-29, 2023.
 - [47] M. T. Varnero Moreno, «Gobierno de chile Ministerio de energia,» 2011. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 23 Mayo 2024].
 - [48] R. V. G. y A. A. L., «Degradacion bacteriana de mmateriales cementiceos,» *Cienciia y tecnologia del Hormigón*, vol. 8, 2000.
 - [49] R. S. S. B. A. K. S. Sood, «Comprehensive Biotechnology,» *Academic Press*, vol. 2, pp. 151-164, 2011.

- [50] J. CRISTHIAN, J. GONZALEZ ROJAS, J. GUTIERREZ PAZ y E. A. ZUÑIGA, «ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA DISMINUCIÓN DE LOS COSTOS ENERGÉTICOS EN EL COLEGIO COMPARTIR DE LA CIUDAD DE CALI».
- [51] N. S. Chain, R. S. Chain y J. M. S. Puelma, Preparación y Evaluación de Proyectos, Sexta Edición ed.
- [52] G. L. Dumrauf, Finanzas Corporativas un enfoque Latinoamericano, Segunda edición ed.
- [53] H. B. Møller, «Biomass and Bioenergy,» de *Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure*, 2005, p. 30.
- [54] C. Holliger, M. Alves, D. Andrade, I. Angelidaki, S. Astals, U. Baier, C. Bougrier, P. Buffiere, M. Caballa, V. de Wilde, F. Ebertseder, B. Fernandez, E. Ficara, I. Fotidis y J. H. Frigon, «Towards a standardization of biomethane potential tests,» *Water Science & Technology*, vol. 74, pp. 1-8, 2016.
- [55] S. Stromberg, M. Nistor y J. Liu, «Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests,» *Waste Management*, vol. 34, pp. 1934-1948, 2014.
- [56] M. E. González Sánchez, S. Pérez Fabiel, A. Wong-Villarreal, R. Bello-Mendazo y G. Yañez-Ocampo, «Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia,» *Revista Argentina de Microbiología*, vol. 47, n° 3, pp. 2029-235, 2015.
- [57] I. Angelidaki y W. Sander, «Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants,» *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, vol. 3, pp. 117-129, 2004.
- [58] «Optimization of the production and quality of biogas in the anaerobic digestion of different types of biomass in a batch laboratory biodigester and pilot plant: Numerical modeling, kinetic study and hydrogen potential,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 93, 22.
- [59] N. Herrero Garcia, A. Mattioli, A. Gil, N. Frison, F. Battista y D. Bolzonela, «Evaluation of the methane potential of different agricultural and food processing substrates for improved biogas production in rural areas,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 1-10, 2019.
- [60] S. Olatunde Dahunsi, S. Oranusi y V. Enontiemonrie Efeobkhan, «Cleaner energy for cleaner production: Modeling and optimization of biogas generation from Carica papayas (Pawpaw) fruit peels,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pp. 19-29, 2017.
- [61] P. G. C. J, C. N, G. S y G. L, «CIPAV.ORG:CO,» Fundación Centro de Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), Cali, Colombia, 2002. [En línea]. Available: <http://www.lrrd.org/lrrd14/1/Pedr141.htm>.

- [62] C. Grandas Taveraa, T. Raab y L. Holguin Trujillo, «Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 173, 2023.
- [63] C. Grandas Tavera, T. Raab y L. Holguin Trujillo, «Valorization of biogas digestate as organic fertilizer for closing the loop on the economic viability to develop biogas projects in Colombia,» *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 4, 2023.
- [64] J. M. Mondragón - García , J. A. Serna-Jiménez, L. S. García -Alzate y L. M. Jaramillo- Echeverry, «Caracterización fisicoquímica de los subproductos cáscara y vástago del plátano,» 23 03 2018.
- [65] D. Kerubo Oyaro, «Batch anaerobic digestion of banana plant residues for methane production,» *University of nairobi faculty of engineering*, n° F80/95467/2014, 2022.
- [66] J. Martí Herrero, Biodigestores Familiares Guia de diseño y manual de instalación, La Paz: Coperación Boliviana Alemana, 2008.
- [67] Profe de biogas, «YouTube,» 19 Diciembre 2018. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=X1c1ELKbzAU&ab_channel=Profedebiogas . [Último acceso: 15 Abril 2024].
- [68] E. HERNANDEZ, O. PRADA, Z. LESMES, C. RUIZ y D. ORTEGA, «Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia,» 2011.
- [69] T. Tesfaye, «Valorisation of Mango Fruit By-products: Physicochemical Characterisation and Future Prospect. Chemical and Process Engineering,» 2017.
- [70] Ministerio de Agricultura, «Sistema de Información de Gestión y Desempeño de Organizaciones de Cadenas,» Junio 2021. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sioc.minagricultura.gov.co/Banano/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>. [Último acceso: 28 Mayo 2024].
- [71] F. GUERRERO SUÁREZ y F. LLANO CAMACHO, «GAS NATURAL EN COLOMBIA - GAS e.s.p.,» *Universidad Icesi*, vol. 19, n° 87, 2002.
- [72] Observatorio regional Ambiental y de Desarrollo sostenible del rio Bogota, «GOV.CO,» Departamento nacional de planeación, 2018. [En línea]. Available: <https://orarbo.gov.co/es/el-observatorio-y-los-municipios/informacion-general-municipio?cd=86c58eeba87c16d064e35c787ceaf79b>. [Último acceso: 23 Mayo 2024].
- [73] AccuWeather, «AccuWeather,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.accuweather.com/es/co/el-colegio/108155/current-weather/108155>. [Último acceso: 23 Mayo 2024].
- [74] I. A. Roa Hoyos, D. F. Sánchez Ríos y G. A. López Martínez, «Biomasa residual en sistema de calefacción de invernadero en Cundinamarca,» *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 18, n° 2, 2021.

- [75] B. M. J y G. R. P. F, «Variation of physical properties of banana along drying for cvs. Musa nana,» *Congreso ibérico de agroindustria y ciencias hortícolas*, pp. 2-6, 2013.
- [76] Comisión nacional del agua-Secretaría de medio ambiente y recursos naturales de Mexico, «LINEAMIENTOS TÉCNICOS: SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A NIVEL VIVIENDA EN ZONA RURAL,» Abril 2021. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152777/LINEAMIENTOS_TRATAMIENTO_AGUAS_NIVEL_VIVIENDA.pdf. [Último acceso: 9 Agosto 2024].
- [77] Acuaplas, «aquaplas.com,» [En línea]. Available: <https://aquaplas.com/tips-mantenimiento-de-biodigestor/>. [Último acceso: 11 Agosto 2024].
- [78] Sistema biobolsa, «sswm,» [En línea]. Available: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SISTEMA%20BIOBOLSA%20s.f.%20Manual%20del%20BIOL.pdf. [Último acceso: 26 Febrero 2025].
- [79] Weima, «Weima,» [En línea]. Available: <https://weima.com/en/trituradoras/>. [Último acceso: 22 Febrero 2025].
- [80] AGROTEL CENOTTEC, «agrotel.eu,» AGROTEL, 2024. [En línea]. Available: <https://agrotel.eu/produkt/freistehender-gasspeicher/>. [Último acceso: 8 Agosto 2024].
- [81] J. L. CARRASCO ALLENDES, «EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO: UNA ESTRATEGIA PARA DIFERENTES CONTEXTOS,» *UNIVERSIDAD DE CHILE-FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS*, pp. 15-184, 2015.
- [82] Aqualimpia, «Aqualimpia,» [En línea]. Available: [https://www.aqualimpia.com/antorchas-biodigestores/#:~:text=Las%20antorchas%20\(biogas%20flares\)%20cuentan,apaga%20cuando%20esta%20presi%C3%B3n%20baja..](https://www.aqualimpia.com/antorchas-biodigestores/#:~:text=Las%20antorchas%20(biogas%20flares)%20cuentan,apaga%20cuando%20esta%20presi%C3%B3n%20baja..) [Último acceso: 9 Agosto 2024].
- [83] EMISON, «La función de la antorcha quemadora de biogás en la estación depuradora de aguas residuales,» *Aguas Residuales*, 14 Noviembre 2014.
- [84] U.S. Air Compressor, «U.S. Air Compressor,» [En línea]. Available: https://usaircompressor.com/product/40-hp-vsd-air-compressor-480/?network=g&device=c&keyword=&campaign=12448091709&adgroup=pla-298334735671&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw_Na1BhAlEiwAM-dm7NbVAit28gotP0hAKvF1mUfOmbZ4womhqrT0mbnpkwEDzUUCDHs2lhoCt6QQAvD_BwE. [Último acceso: 10 Agosto 2024].

- [85] AQUALIMPIA ENGINEERING, «Se deben instalar tres mezcladores a lo largo del biodigestor, cada uno a 24.96 m de distancia e intercalándolos por costado de biodigestor.,» *AQUALIMPIA ENGINEERING*, pp. 32-39.
- [86] Aqua Limpia Engineering, «Aqua Limpia,» Junio 2014. [En línea]. Available: <https://www.aqualimpia.com/biodigestores-agitadores/>. [Último acceso: 22 Abril 2024].
- [87] M. Herrero J, «Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación,» *Redbiolac*, nº ISBN: 978-9942-36-276-6, 2019.
- [88] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA - UPME, «RESOLUCIÓN No. 000712 de 2024,» 2024.
- [89] M. cuadrado, «Metro cuadrado.com,» [En línea]. Available: <https://www.metrocuadrado.com/inmueble/venta-lote-o-casalote-mesitas-del-colegio-bellavista/10457-M2537395> . [Último acceso: 07 2024].
- [90] ESP, VERA GAS SAS, «VERA GAS SAS ESP,» [En línea]. Available: <https://veragas.com.co/>. [Último acceso: 07 2024].
- [91] Exfactory, «exfactory.com,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.exfactory.com/DetailNew/WH-300027/weima-wlk-8>. [Último acceso: 26 Julio 2024].
- [92] Casillero Virtual 4.72, «casillerovirtual.com,» [En línea]. Available: <https://www.casillerovirtual.com.co/>. [Último acceso: 28 Julio 2024].
- [93] P. Atierra, «Instagram de Proyectos a Tierra,» [En línea]. Available: <https://www.instagram.com/proyectosatierra/>. [Último acceso: 07 2024].
- [94] AERZEN, «AERZEN,» [En línea]. Available: <https://www2.aerzen.com/es-co/producto/biogas-compressor-series-c.html>. [Último acceso: 07 2024].
- [95] U. A. COMPRESSOR, «U.S AIR COMPRESSOR,» [En línea]. Available: https://usaircompressor.com/product/40-hp-vsd-air-compressor-480/?network=g&device=c&keyword=&campaign=12448091709&adgroup=pla-298334735671&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw_Na1BhAlEiwAM-dm7NbVAit28gotP0hAKvF1mUfOmbZ4womhqrT0mbnpkwEDzUUCDHs2lhoCt6QQAyD_BwE. [Último acceso: 08 2024].
- [96] Made-in-China, «es.made-in-china.com,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_mingshuo/product_Double-Membrane-Biogas-Storage-Tank_eirhriogy.html. [Último acceso: 08 2024].
- [97] L. Republica, «Estos son los cálculos para crear y registrar una empresa en Colombia con precios de 2022».
- [98] M. Malavé, «Neolo,» [En línea]. Available: <https://www.neolo.com/blog/cuanto-cuesta-abrir-una-empresa-en-colombia.php>. [Último acceso: 10 2024].
- [99] I. C. Agroprecuario, «Instituto Colombiano Agroprecuario,» [En línea]. Available: <https://www.ica.gov.co/oferta-institucional/tarifas>. [Último acceso: 10 2024].

- [100] B. LIMPIA, «BOGOTA LIMPIA,» [En línea]. Available: <https://www.bogotalimpia.com/servicios-especiales-2/>. [Último acceso: 08 2024].
- [101] E. ESP, «EMPUCOL EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DEL COLEGIO,» [En línea]. Available: https://drive.google.com/file/d/1TDahbsUiQYSHhS2d5_M4JFREWB1CBErD/view. [Último acceso: 08 2024].
- [102] POLITECNICO DE SURAMERICA EDUCACION CERTIFICADA, «POLITECNICO DE SURAMERICA EDUCACION CERTIFICADA,» 29 04 2024. [En línea]. Available: <https://www.polisura.edu.co/liquidacion-de-prestaciones-sociales-como-hacerlas#:~:text=Las%20prestaciones%20sociales%20incluyen%20derechos,al%20empleado%20como%20al%20empleador..> [Último acceso: 08 2024].
- [103] BBVA, «BBVA,» [En línea]. Available: <https://www.bbva.com.co/content/dam/public-web/colombia/documents/empresas/productos/leasing/Tasas-leasing.pdf>. [Último acceso: 10 2024].
- [104] B. C. Social, «Banco Caja Social,» [En línea]. Available: <https://www.bancocajasocial.com/content/dam/bcs/documentos/informacion-corporativa/tasas-precios-y-comisiones/credito-empresas/Tasas-Credito-Productivo.pdf>. [Último acceso: 10 2024].
- [105] Enel, «Enel,» [En línea]. Available: <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html>. [Último acceso: 07 2024].
- [106] M. d. Ambiente, «Ministerio de Ambiente,» [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/conozca-los-beneficios-tributarios-para-empresas-que-ayuden-a-proteger-el-medio-ambiente/>. [Último acceso: 10 2024].
- [107] Vidagas, «Vidagas,» 02 2024. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.vidagas.co/wp-content/uploads/2024/02/precios-unigas-y-vidagas-febrero.pdf>. [Último acceso: 07 2024].
- [108] C. Productiva, «Colombia Productiva,» [En línea]. Available: <https://www.colombiaproductiva.com/PTP/media/documentos/EnCadena/frutasbi ofertilizantes/Anexo-Tecnico-No-2-2-Cadena-de-Biofertilizantes.pdf>. [Último acceso: 10 2024].
- [109] SANAGRO, «SANAGRO,» [En línea]. Available: https://sanagroagricultura.mercadoshops.com.co/MCO-849384144-biofertilizante-abono-liquido-4-litros-_JM. [Último acceso: 08 2024].
- [110] BioCycle, «BioCycle,» [En línea]. Available: <https://www.biocycle.net/basics-biogas-upgrading/>. [Último acceso: 03 2025].
- [111] cvwrfut, «cvwrfut,» [En línea]. Available: <https://cvwrfut.gov/solids-treatment-process/>. [Último acceso: 03 2025].

- [112] K. mudryk y J. Fraczek, «ANALYSYS OF MECHANICAL DEWATERING OF DIGESTATE,» 2016. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/313589127_Analysis_of_Mechanical_Dewatering_of_Digestate. [Último acceso: 03 2025].
- [113] T. Data, «TTR Data,» [En línea]. Available: <https://www.ttrdata.com/es/ttr-in-the-press/En-que-invertir-en-Colombia-en-2024-Algunas-claves-de-los-sectores-y-activos-para-tener-en-el-radar/9086/>. [Último acceso: 10 2024].
- [114] Sistemabio, «sistema bio No hay desechos solo residuos,» [En línea]. Available: <https://sistema.bio/co/>. [Último acceso: 07 2024].
- [115] HomeCenter , «HomeCenter,» [En línea]. Available: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/>. [Último acceso: 07 2024].
- [116] S. D. Integrales, «Soluciones Dinamicas Integrales SDI,» [En línea]. Available: <https://solucionesdinamicassdi.com/es/>. [Último acceso: 07 2024].
- [117] V. S. ESP, «Vanti mas formas de avanzar,» [En línea]. Available: <https://www.grupovanti.com/nuevo-punto-de-gas/tarifas-derechos-de-conexion>. [Último acceso: 07 2024].
- [118] V. S. ESP, «Vanti SA ESP,» [En línea]. Available: <https://www.grupovanti.com/servicios-gas/distribucion-de-gas/busqueda-de-distribucion-gas-tarifas?anio=2024&empresa=Vanti%20S.A.%20ESP>. [Último acceso: 07 2024].
- [119] M. GROUP, «MORKEN GROUP,» [En línea]. Available: <https://morkengroup.com/sistema-de-tuberias-flexibles-para-transporte-de-hidrocarburos-y-aguas/#:~:text=UNA%20SOLUCI%C3%93N%20EFECTIVA%20PARA%20M%C3%9ALTIPLES,fallas%20producidas%20por%20este%20motivo>. [Último acceso: 03 2025].
- [120] SoluForce, «SoluForce,» [En línea]. Available: <https://www.soluforce.com/hydrocarbons.html>. [Último acceso: 03 2025].
- [121] B. Bharathiraja, T. Sudharsanaa y A. Bharghavi, «Biohydrogen and Biogas–An overview on feedstocks and enhancement process,» *Fuel*, vol. 185, pp. 810-828, 2016.
- [122] Z. Csereklyei, Q. Songze y T. Ancev, «The effect of wind and solar power generation on wholesale electricity prices in Australia,» *Energy Policy*, vol. 131, pp. 358-369.
- [123] J. A. Arboleda G., Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades., Medellín, Colombia, 2008.
- [124] E. A. Páez Lugo, M. Jaramillo Zapat y P. A. Mora Adán, «Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021,» Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogota, 2021.

- [125] Caracol Radio, «Estudio revela cifras de impacto social en Relleno sanitario Doña Juana,» 24 Noviembre 2017. [En línea]. Available: https://caracol.com.co/emisora/2017/11/24/bogota/1511547132_818187.html .
- [126] Alcaldía mayor de Bogota, «Alcaldía mayor de Bogota,» [En línea]. Available: <https://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/> . [Último acceso: 10 Nviembre 2023].
- [127] C. R. H. Sampieri, C. F. Collado y P. B. Lucio, «METODOLOGÍA DELA INVESTIGACIÓN,» 1997.
- [128] T. S, Guía práctica para el manejo del banano orgánico en el valle del chira. Perú, CHIRA, 2012.
- [129] Sistema Biobolsa, «Sistema de biobolsa,» 2024. [En línea]. Available: www.sistemabiobolsa.com. [Último acceso: 5 Marzo 2024].
- [130] CONSRCIO PROVINCIAL RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS, «RESIDUOS ORGÁNICOS,» [En línea]. Available: <https://www.consorciorsumalaga.com/5936/residuos-organicos>. [Último acceso: 11 Noviembre 2023].
- [131] Genia Bioenergy, «Biogás y biodigestores: Tipos, ventajas y beneficios,» [En línea]. Available: <https://geniabioenergy.com/biogas-y-biodigestores-tipos-ventajas-y-beneficios/>. [Último acceso: 11 Noviembre 2023].
- [132] Safety Culture, «Sistema de gestión de residuos: Una guía,» [En línea]. Available: <https://safetyculture.com/es/temas/gestion-de-residuos/>. [Último acceso: 11 Noviembre 2023].
- [133] Sistema Verde, «Aprovechamiento de residuos,» [En línea]. Available: <https://www.sistemaverde.com.co/articulos/aprovechamiento-de-residuos#:~:text=Aprovechamiento%20de%20residuos%3A%20%C2%BFQu%C3%A9%20es,la%20reutilizaci%C3%B3n%20y%20el%20reciclaje..> [Último acceso: 11 Noviembre 2023].
- [134] J. Peña, «Planeación del Efectivo,» *Universidad Autónoma De Santo Domingo*, 2007.
- [135] G. Rodríguez Mesa, «La evaluación financiera y social de proyectos de inversión,» *Tercera Edición Facultad de Economía*, 2006.
- [136] Y. D. Cobas, «ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PRODUCTO SISTEMA AUTOMATIZADO CUBANO PARA EL CONTROL DE EQUIPOS MÉDICOS,» *Área de Innovación y Desarrollo, S.L*, vol. VI, nº 4, 2017.
- [137] P. K. Dimitris y K. Robert Ham, «Carbon dioxide and ammonia emissions during composting,» *Waste Management*, vol. 26, pp. 1-8, 2006.
- [138] ServiciosManufactureros, «OAS-More rights for more peple,» OAS, 4 enero 2020. [En línea]. Available:

- <https://www.oas.org/dsd/Energy/Documents/SimposioG/3%20Panel%20I%20Biogas.pdf>. [Último acceso: 14 Julio 2024].
- [139] D. F. GARZÓN AMAYA, «APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DEL RELLENO DE DOÑA JUANA PARA OBTENCIÓN DE ENERGÍA,» *FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA*, p. 15, 2019.
- [140] Genia Bioenergy, «geniabioenergy.com,» [En línea]. Available: <https://geniabioenergy.com/biogas-y-biodigestores-tipos-ventajas-y-beneficios/#:~:text=Existen%20dos%20tipos%20esenciales%20de,c%C3%A1maras%20de%20carga%20y%20descarga..> [Último acceso: 23 Julio 2024].
- [141] Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad De Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, «Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: https://www.giz.de/en/downloads/ENRES%20Estudio_determinar_potencial_produccion_biogas_env_2.pdf. [Último acceso: 7 Agosto 2024].
- [142] Inter Rapidísimo, «interrapidísimo.com,» [En línea]. Available: <https://interrapidísimo.com/cotiza-tu-envio/>. [Último acceso: 08 2024].