



**Evaluación del potencial energético del biogás a partir de biorresiduos
generados en comercializadoras de alimentos**

Claudia Nathaly Naranjo Díaz

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible

Bogotá, Colombia

día/mes/año

**Evaluación del potencial energético del biogás a partir de biorresiduos generados en
comercializadoras de alimentos**

Claudia Nathaly Naranjo Díaz

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Proyectos de Desarrollo Sostenible

Directora:

Elizabeth León Velásquez

PhD en Ciencias Ambientales

Modalidad:

Monografía

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible

Bogotá, Colombia

día/mes/año

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

Primeramente, a Dios, su guía y ayuda me acompañaron a lo largo de este camino. A mis padres, por su ejemplo constante de integridad y su confianza plena en mi formación, esta etapa culmina gracias a su apoyo incondicional y sostén en cada paso.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, familia y amigos, cuyo acompañamiento constante, afecto y confianza han sido pilares fundamentales a lo largo de este proceso académico. Su apoyo emocional y sus palabras de aliento me brindaron la fortaleza necesaria para avanzar con convicción y propósito.

A la profesora Elizabeth León, directora de esta monografía, agradezco profundamente su orientación rigurosa, su compromiso académico y su generosa disposición para guiarme con claridad, exigencia y calidez intelectual.

A las profesoras de la Universidad EAN, Ana Katherine Díaz, Leidy Natalia Zapata, Marie José Chery y Johana Karina Solano, quienes integraron el panel de expertos, valoro especialmente sus aportes, que constituyeron un insumo esencial para el fortalecimiento de esta investigación.

Finalmente, agradezco a la Universidad EAN por ofrecer un espacio de formación integral que promueve el pensamiento crítico, la sostenibilidad y el compromiso con la transformación social.

Resumen

La presente monografía aborda el aprovechamiento energético de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, con énfasis en la producción de biogás mediante digestión anaerobia. Como datos referencia y de soporte para la investigación, se tomó la dinámica operativa de Corabastos S.A., principal central de abasto en Bogotá D.C., donde se generan grandes volúmenes de residuos orgánicos con alto potencial calorífico. El objetivo correspondió a evaluar, a partir de información secundaria, las condiciones óptimas para la producción de biogás, mediante la revisión documental, análisis técnico de sustratos y validación experta.

Se identificaron frutas, verduras, hortalizas y cítricos como residuos clave, con composición de sólidos volátiles entre 78 – 89% y humedad superior al 80%. Se definió que las condiciones mesofílicas (35 – 40 °C), pH neutro (6.8 –7.4) y pretratamientos físicos, químicos y biológicos permiten mejorar la eficiencia del proceso. Se establece que esta alternativa es viable técnica y ambientalmente, la cual contribuye a la reducción de GEI, promueve la economía circular y puede ser replicada en estudios piloto y de aplicabilidad para el aprovechamiento de biorresiduos.

Palabras clave: Biogás, Biorresiduos, Digestión anaerobia, Economía circular, Energía renovable.

Abstract

This monograph explores the energy recovery potential of biowaste generated by food commercializers, with a focus on biogas production through anaerobic digestion. As reference and supporting data for the research, the operational dynamics of Corabastos S.A.—the main wholesale market in Bogotá—were examined, given its generation of large volumes of organic waste with high calorific potential. The objective was to evaluate, based on secondary information, the optimal conditions for biogas production through document review, technical substrate analysis, and expert validation.

Fruits, vegetables, leafy greens, and citrus were identified as key waste types, with volatile solids ranging from 78–89% and moisture content exceeding 80%. It was determined that mesophilic conditions (35–40 °C), neutral pH (6.8–7.4), and physical, chemical, and biological pretreatments enhance process efficiency. This alternative is considered technically and environmentally viable, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions (GHG), promoting the circular economy, and offering replicability in pilot studies and practical applications for biowaste utilization.

Keywords: Biogas, Biowaste, Anaerobic digestion, Circular economy, Renewable energy.

Contenido

Lista de Tablas	10
Lista de figuras	11
Introducción.....	12
Objetivos	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
Justificación.....	17
Marco Teórico	19
Problemática de los residuos orgánicos en Colombia.....	19
Alternativas de aprovechamiento de biorresiduos.....	23
La transición energética en Colombia: retos y oportunidades para los biorresiduos...	28
Marco normativo.....	30
Compromisos internacionales.....	30
Estrategia nacional.....	30
Transición Energética y Fuentes Renovables.....	31
Producción y Comercialización de Biocombustibles.....	32
La Responsabilidad Social Empresarial (RSE).....	33
La sostenibilidad organizacional.....	34
Hipótesis	37
Metodología	37
Revisión de Literatura y Datos.....	37
Análisis de Datos Secundarios.....	38
Instrumentos.....	38
Enfoque y alcance de la investigación.....	38
Diseño de investigación.....	39
Técnica de Análisis de la Información.....	39
Análisis Cualitativo.....	39
Variables	41
Desarrollo de la Investigación.....	43
1. Aprovechamiento de Biorresiduos: Revisión Técnica y Conceptual para la Producción de Biogás	43

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS
A PARTIR DE BIORRESIDUOS GENERADOS EN
COMERCIALIZADORAS DE ALIMENTOS**

9

2. Identificación y caracterización de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos.....	50
2.1. Caracterización de las centrales de abasto en el país.....	51
2.2. Tipos de residuos en centrales de abasto en Bogotá y su contenido energético. 55	
2.2.1. Residuos cítricos.....	55
2.2.2. Residuos de frutas y verduras.....	60
3. Condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos.....	66
3.1. Caracterización de los sustratos.	67
3.2. Condiciones ambientales óptimas.....	67
3.3. Pretratamientos del Sustrato.....	68
4. Validación de las condiciones óptimas propuestas para la producción de biogás.....	69
4.1. Pertinencia técnica de los biorresiduos.	71
4.2. Condiciones óptimas de operación.	72
4.3. Pretratamientos recomendados.	72
4.4. Caracterización energética de los residuos.....	73
4.5. Recomendaciones estratégicas para la implementación.....	74
5. Discusión de Resultados	76
Conclusiones.....	79
Referencias	82
Anexos	96
Anexo A. Formato de entrevista semiestructurada a expertos.....	96
Anexo B. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 1	98
Anexo C. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 2.....	102
Anexo D. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 3.....	106
Anexo E. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 4	110

Lista de Tablas

Tabla 1. Variables de estudio reportadas en la literatura	41
Tabla 2. Relación de la sostenibilidad en la producción de biocombustibles.....	44
Tabla 3. Rendimiento de biogás y metano por tipo de sustrato.....	49
Tabla 4. Composición química del biogás posterior a la refinación.....	50
Tabla 5. Mercados de la Red Nacional de Centrales de Abastos.	53
Tabla 6. Producción de biogás con eliminación de limoneno.....	57
Tabla 7. Producción de biogás con pretratamiento biológico	58
Tabla 8. Resultados de la digestión anaeróbica y codigestión con una mezcla de frutas y verduras.....	61
Tabla 9. Resultados del potencial energético del biogás por el método BMP.	62
Tabla 10. Eficiencia de la producción de biogás bajo la variable de temperatura	64
Tabla 11. Producción de biogás a partir de un método de digestión anaerobia híbrida en tres fases.....	65
Tabla 12. Métodos de eliminación de inhibidores	68
Tabla 13. Validación del tipo de pretratamiento por parte de las expertas.....	73

Lista de figuras

Figura 1. Flujo de materiales en las centrales de abasto.....	21
Figura 2. Esquema de un sistema tradicional de producción de biogás	26
Figura 3. Clasificación de la biomasa.....	46
Figura 4. Producción de alimentos por grupo de cultivos (toneladas).....	52
Figura 5. Diagrama del funcionamiento del reactor anaerobio con membranas:	59

Introducción

La gestión sostenible de residuos orgánicos representa uno de los desafíos más urgentes en el marco de la transición energética y la economía circular. Este estudio se inscribe en el campo de la bioenergía, la ingeniería ambiental y el desarrollo sostenible, enfocándose en el aprovechamiento energético de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos mediante digestión anaeróbica. Esta tecnología permite transformar residuos biodegradables en biogás, contribuyendo simultáneamente a la mitigación del cambio climático y a la diversificación de la matriz energética nacional.

El eje central de esta investigación se fundamenta en las deficiencias existentes en la gestión de los residuos orgánicos. De acuerdo con un estudio de la Dirección de Seguimiento y Evaluación de Políticas Públicas (DSEPP) del Departamento Nacional de Planeación, publicado en 2016, en Colombia se desperdician aproximadamente 9,76 millones de toneladas de alimentos al año, lo que equivale al 34% de la oferta nacional disponible (Departamento Nacional de Planeación, 2024).

En particular, las centrales de abastos representan uno de los focos más críticos en la generación de residuos orgánicos urbanos, a pesar de su alto volumen y potencial energético, estos biorresiduos no reciben ningún tipo de aprovechamiento, siendo enviados directamente a rellenos sanitarios, esta práctica genera múltiples impactos negativos: aumento de la presión sobre la capacidad de los rellenos, emisión de GEI por descomposición no controlada, generación de lixiviados y pérdida de recursos valorizables (Vargas Pineda et al., 2019). Las estrategias de reutilización o transformación son limitadas reflejando una brecha estructural en la gestión ambiental urbana, donde predomina un enfoque lineal de disposición final (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Frente a esta problemática, el presente estudio propone una alternativa de valorización energética mediante digestión anaeróbica, reconociendo que estos residuos pueden ser transformados en biogás y, en escenarios futuros, integrarse a esquemas de cogeneración de energía. Este estudio tiene la intención de abrir oportunidades para el desarrollo de modelos sostenibles en el manejo de residuos orgánicos en entornos urbanos densamente poblados.

La digestión anaeróbica constituye el método más común para la generación de biogás con alto contenido de metano. Los residuos procedentes de frutas, verduras y hortalizas presentan más de un 78% de sólidos volátiles y una humedad superior al 80%, características que los convierten en sustratos idóneos para la conversión de materia orgánica en biogás, alcanzando entre un 60% y 70% de metano (CH_4) en volumen (Appels et al., 2008). Este gas posee un poder energético de 35,8 kJ/L en condiciones estándar (Montiel Corona & Razo-Flores, 2018), Sin embargo, su optimización enfrenta múltiples desafíos técnicos tales como, la inestabilidad de las comunidades microbianas la cual depende de la sinergia entre microorganismos acidogénicos y metanogénicos, y las limitaciones en la calidad del biogás producido, es decir, su proporción de metano se ve afectada por el tipo de sustrato y su relación C/N (Sawatdeenarunat et al., 2015).

Para superar estas limitaciones, se han implementado pretratamientos especializados, sistemas de digestión de alto rendimiento, control microbiano optimizado y tecnologías innovadoras orientados a incrementar tanto la generación como la calidad del metano. Dentro de estos pretratamientos, destacan las técnicas mecánicas, químicas y biológicas, cuyo propósito es facilitar la descomposición de la biomasa y potenciar la eficiencia global del proceso anaeróbico (Uranga-Valencia et al., 2025). En esta monografía, a partir del análisis de fuentes secundarias, se resalta que la digestión

anaeróbica bajo condiciones mesofílicas (35–40 °C), pH neutro (6.8–7.4) y la aplicación de pretratamientos adecuados ha sido validada como una tecnología eficaz para valorizar residuos orgánicos mediante su transformación en biogás.

En este contexto, la identificación de parámetros óptimos se vuelve crucial para garantizar la viabilidad técnica y ambiental de los sistemas de digestión anaeróbica. Esta necesidad orienta el presente estudio hacia una exploración detallada de las variables que inciden en la eficiencia del proceso, dando lugar a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, que permitan su aprovechamiento energético de manera técnica, ambiental y estratégicamente viable?

Para dar respuesta a esta pregunta, el documento se organiza en cinco capítulos, elaborados a partir de una revisión exhaustiva de la literatura disponible vinculada con el tema de investigación, complementada con la recopilación y el análisis de datos secundarios procedentes de entidades gubernamentales y de organizaciones que aportan información técnica y académica relacionada con la generación de biogás. El primer capítulo presenta el marco teórico, abordando la problemática de los residuos orgánicos, antecedentes técnicos y normativos, y el enfoque de sostenibilidad organizacional. El segundo capítulo desarrolla la metodología, basada en revisión documental, análisis técnico de sustratos y validación experta. El tercer capítulo caracteriza los biorresiduos generados en centrales de abasto a partir de información secundaria y propone las condiciones óptimas para su valorización energética. El cuarto capítulo presenta la validación de dichas condiciones mediante entrevistas semiestructuradas a expertas en digestión anaeróbica. Finalmente, el quinto capítulo

discute los resultados y plantea conclusiones orientadas a la replicabilidad de las recomendaciones dadas en el presente documento.

Este estudio busca aportar evidencia técnica y estratégica hacia la transición de modelos energéticos sostenibles y la consolidación de prácticas de economía circular en el sector alimentario, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 12 (producción y consumo responsables), y responde al llamado internacional de adoptar tecnologías limpias para enfrentar los desafíos del cambio climático (Naciones Unidas, 2015).

Objetivos

Objetivo general.

Evaluar a partir de información secundaria el potencial de producción de biogás a partir de diferentes biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos.

Objetivos específicos.

Para la consecución de este objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los tipos de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos para la producción de biogás.
- Caracterizar los biorresiduos a partir de su poder calorífico para la producción de biogás.
- Proponer las condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos.
- Validar las recomendaciones dadas en el presente documento para la producción de biogás a partir de biorresiduos.

Justificación

La presente investigación tiene como finalidad proponer alternativas de aprovechamiento sostenible para los biorresiduos generados en las unidades de producción y transformación de alimentos. Esta iniciativa responde a una creciente conciencia ambiental por parte de los consumidores, quienes priorizan productos y servicios que contribuyan a la mitigación del cambio climático. Los hábitos de consumo actuales han generado una segmentación del mercado orientada hacia estilos de vida que promueven la reducción de desperdicios y el aprovechamiento de residuos, lo que exige a las organizaciones adoptar prácticas responsables que optimicen el uso de recursos y minimicen su impacto ambiental.

Diversos estudios han demostrado que la gestión inadecuada de residuos orgánicos representa una de las principales fuentes de contaminación en entornos urbanos, debido a la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de lixiviados y la presión sobre los sistemas de disposición final (Appels et al., 2008; Sawatdeenarunat et al., 2015). En particular, los residuos provenientes de frutas, verduras y hortalizas poseen un alto contenido de humedad y sólidos volátiles, lo que los convierte en sustratos con alto potencial energético si se gestionan adecuadamente. Sin embargo, en la mayoría de los países latinoamericanos, estos residuos son descartados sin tratamiento, lo que genera impactos negativos tanto ambientales como sociales (Ubillús Farfán et al., 2024).

En este contexto, las unidades de comercialización de alimentos frescos carecen de estrategias eficaces para el manejo de biorresiduos, cuando los productos no cumplen con los parámetros definidos por el mercado, son descartados sin tratamiento, lo que genera impactos negativos como su acumulación en rellenos sanitarios, el aumento del gasto público en gestión de residuos y riesgos para la salud de las comunidades

cercanas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2025; Ubillús Farfán et al., 2024). Frente a esta problemática, la investigación propone la necesidad de redefinir los modelos operativos de dichas unidades, incorporando criterios de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social que promuevan prácticas más seguras, eficientes y respetuosas con el entorno.

La transición hacia modelos de economía circular es clave para enfrentar los desafíos ambientales actuales. Según Kirchherr et al., (2017), la economía circular permite desacoplar el crecimiento económico del consumo de recursos finitos, promoviendo la reutilización, el reciclaje y la valorización de residuos como parte de un sistema regenerativo.

En coherencia con este enfoque, el Gobierno Nacional ha asumido compromisos internacionales como el Pacto Mundial de la ONU (Naciones Unidas, 2019), que exhorta a las empresas a adoptar prácticas fundamentadas en los derechos humanos, la transparencia ambiental y la lucha contra la corrupción. La transición hacia modelos de negocio sostenibles contribuye directamente al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), conforme a la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2018), estableciendo un compromiso individual y colectivo en favor del desarrollo responsable.

Marco Teórico

Las organizaciones que asumen un compromiso activo con la gestión responsable de sus operaciones, orientadas a reducir impactos negativos sobre el entorno, han superado el modelo económico lineal que predominó durante el siglo XX, según Dams (2023), este modelo económico impulsó el uso indiscriminado de recursos naturales para la producción de bienes y servicios, promoviendo una lógica de consumo basada en la extracción, fabricación y descarte acelerado, esta praxis descrita por Fischer (2022), como “tomar, fabricar y desechar”, ha contribuido al agravamiento de las crisis ecológica, económica y social que enfrenta el planeta. Frente a este escenario, se vuelve imperativo evaluar alternativas de solución mediante estrategias integrales que aborden las causas estructurales del cambio climático y el incremento de la huella de carbono, al tiempo que promuevan un modelo de desarrollo económico sostenible, ético y responsable.

Problemática de los residuos orgánicos en Colombia.

En Colombia persisten desafíos significativos en torno al manejo adecuado de los residuos alimenticios, especialmente en contextos urbanos donde su disposición final genera impactos ambientales considerables, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2024), en el 2022 se generó 31,31 millones de toneladas de residuos sólidos y productos residuales, lo que representa un incremento del 2,2% con relación al año 2021, aunque la tasa de aprovechamiento mediante procesos como la co-generación de energía, reciclaje y otras formas de valorización alcanzó el 55,79%, este avance fue apenas del 0,7% en comparación con el año 2021, lo que evidencia una brecha estructural en la gestión sostenible de residuos.

Actualmente, el país cuenta con 144 rellenos sanitarios para la disposición de residuos sólidos ubicados en la región Andina (66,9%), región Caribe (11,5%), Orinoquía

(8,10%), Pacífica (8,10%) y Amazonía (4,7%), (Cristancho Montenegro et al., 2020). La acumulación de residuos no aprovechados en rellenos sanitarios provoca la generación de lixiviados y emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al deterioro ambiental y al aumento de la huella ecológica, esto debido a las altas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos tales como los ácidos húmicos, nutrientes y metales pesados (mp) como zinc, arsénico, cadmio, níquel cobre, plomo, aluminio, estaño, selenio y mercurio, entre otros (Cristancho Montenegro, 2013).

En este contexto, la presión de los residuos orgánicos provenientes de plazas de mercado sobre los rellenos sanitarios contribuye a la emisión de olores desagradables, gases contaminantes y agentes infecciosos que afectan negativamente tanto la calidad de vida de las comunidades cercanas como la integridad de los ecosistemas adyacentes. Las plazas de mercado y centrales de abasto no solo cumplen la función de distribuir alimentos a la población, sino que también se constituyen en puntos críticos de generación de residuos orgánicos, reciclables, especiales y no aprovechables, así como de pérdidas de alimentos y vertimientos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). Esta dualidad entre el ingreso de recursos y la salida de desechos plantea un desafío en términos de sostenibilidad, ya que la gestión inadecuada de estos flujos puede profundizar los impactos ambientales y sociales. En la siguiente ilustración se relaciona el flujo de materiales de estos centros de comercialización.

Figura 1.

Flujo de materiales en las centrales de abasto.



Nota. Tomado del documento Guía para la gestión sostenible de las plazas de mercado y centrales de abasto en Colombia, por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023.

Ante esta problemática, resulta imperativo el diseño e implementación de políticas públicas que promuevan espacios de formación ciudadana orientados a fortalecer la conciencia ambiental y la responsabilidad individual. En este sentido, la Alcaldía Mayor de Bogotá ha desarrollado herramientas pedagógicas como la cartilla sobre el adecuado manejo de residuos sólidos, basados en la estrategia de las 3R's: Reducir, Reutilizar y Reciclar, dirigida tanto a los servidores públicos como a los hogares (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015), complementariamente, el programa "Basura Cero" en coordinación con UAESP (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos) fomenta una cultura de consumo consciente y responsable, capacitando a la ciudadanía en prácticas de reducción, separación y aprovechamiento de residuos sólidos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2023). Lo ideal es que todas estas herramientas sean aplicadas en las centrales de abasto donde se genera un gran número de residuos orgánicos.

Estas iniciativas impactan positivamente en indicadores ambientales clave, como la mitigación de los efectos del cambio climático, la recuperación de cuerpos hídricos, la inclusión social de la población recicladora y el fortalecimiento del rol institucional en los procesos ambientales y sociales. No obstante, persisten limitaciones estructurales: Cada política debe adaptarse al nivel de desarrollo de cada localidad, considerando factores como el acceso a la información, la disponibilidad tecnológica, la infraestructura de contenedores y las herramientas necesarias para garantizar una separación eficiente y un aprovechamiento adecuado de los residuos.

De acuerdo con lo expuesto por Oviedo-Ocaña et al. (2016), quienes destacan que, en países en desarrollo, los sistemas de aprovechamiento de biorresiduos enfrentan retos específicos, tales como: La estructuración organizativa de la gestión empresarial, la definición de estándares de calidad para los productos derivados del aprovechamiento, el involucramiento del sector agropecuario en la promoción y uso del compostaje, y los biocombustibles, así como la formulación de políticas públicas que incluyan incentivos ambientales y el desarrollo de proyectos piloto que impacten variables técnicas, ambientales, socioeconómicas e institucionales.

Desde el punto de vista técnico, en Colombia son escasas las iniciativas lideradas por gobiernos locales para el manejo integral de biorresiduos, se destacan algunos esfuerzos como programas de compostaje y reciclaje comunitario, bajo este contexto, se han instalado plantas de compostaje principalmente en municipios con poblaciones menores a 15.000 habitantes, estas presentan deficiencias en cuanto a la calidad del producto final, lo que ha motivado al desarrollo de investigaciones en la última década orientadas a mejorar tanto el proceso como la calidad del compost, estas investigaciones han abordado dimensiones: “biológicas (indicadores microbiológicos, de estabilidad y de madurez), físicas (densidad, retención de agua, conductividad eléctrica), químicas (pH,

capacidad de intercambio catiónico, nutrientes, materia orgánica) y agronómicas” (Soto-Paz et al., 2017), con el fin de desarrollar modelos productivos que permitan incursionar en un nicho de mercado para la comercialización del compost con estándares de calidad.

En los centros de comercialización de alimentos, especialmente en las centrales de abasto, se generan grandes volúmenes de desperdicio orgánico, en el caso de Corabastos S.A., ubicada en la ciudad de Bogotá, se reporta una generación mensual de 2.100 toneladas/mes de residuos compuesto por el 50% verduras y 14% frutas, según Peñaranda González et al. (2017), por medio de la hidrólisis ácida es posible la obtención de 3325 litros de etanol/día, lo que evidencia el potencial energético de estos residuos y su viabilidad para la producción controlada de biocombustibles.

En síntesis, los residuos orgánicos representan un reto ambiental y social, pero también constituyen una oportunidad para innovar en modelos productivos sostenibles.

Alternativas de aprovechamiento de biorresiduos.

La transición de una economía lineal a una economía circular (EC) ha redefinido los modelos de producción y consumo, esta metodología se fundamenta en tres principios: “i) eliminar los residuos y la contaminación, ii) circular productos y materiales, iii) regenerar la naturaleza” (Camargo Mayorga et al., 2024), la EC se aplica al aprovechamiento de los biorresiduos provenientes principalmente de la industria de producción y comercialización de alimentos, la preparación de alimentos en los hogares, la agricultura y el sector HORECA (Hoteles, restaurantes y cafeterías), convirtiéndose en insumos estratégicos para cerrar ciclos de producción y consumo, mediante un proceso resultante de la descomposición aeróbica de los biorresiduos bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, se obtiene compost o biofertilizante, utilizado para recuperar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, este producto

puede destinarse tanto a la producción agrícola como a la restauración de la capa vegetal degradada por prácticas agropecuarias extensivas.

Según Martínez-Blanco et al. (2013), el compost derivado de biorresiduos presenta efectos positivos sobre el suelo, validados mediante la evaluación del ciclo de vida (LCA), entre estos beneficios se destacan: 1) El suministro de nutrientes y el secuestro de carbono, 2) La supresión de plagas y enfermedades, la productividad del suelo y la calidad nutricional de los cultivos, 3) Los beneficios relacionados con la erosión y la humedad del suelo. En consecuencia, el compost se consolida como una alternativa orgánica que no solo mejora la salud del suelo, sino que también reduce el uso de pesticidas químicos y la contaminación de afluentes hídricos.

Si bien el compost se convierte en una alternativa aprovechable para la gestión de residuos y la nutrición del suelo, el autor Van Zanten et al. (2019), indica como desafío que los fertilizantes orgánicos solo pueden ser absorbidos por las raíces después de que el material orgánico se haya mineralizado y liberado, siendo una alternativa poco eficiente para un mercado altamente demandante en alimentos, el autor propone que estos biorresiduos se utilicen para la producción de biomasa destinada para la alimentación animal, y emplear las tierras cultivables para la producción de alimentos en lugar de cultivos forrajeros para la alimentación animal, se contempla como una posibilidad para una simbiosis industrial entre la cercanía de la fuente de emisión de desperdicio de alimentos y la producción de animales monogástricos en granja.

En paralelo, la producción de biocombustibles representa una opción clave para sustituir combustibles fósiles, este enfoque permite el aprovechamiento de los biorresiduos y otros compuestos orgánicos mediante procesos tecnológicos que transforman los desechos en energía renovable, un ejemplo de ello es el etanol, obtenido a partir de la fermentación, hidrólisis y destilación de residuos con alto contenido de

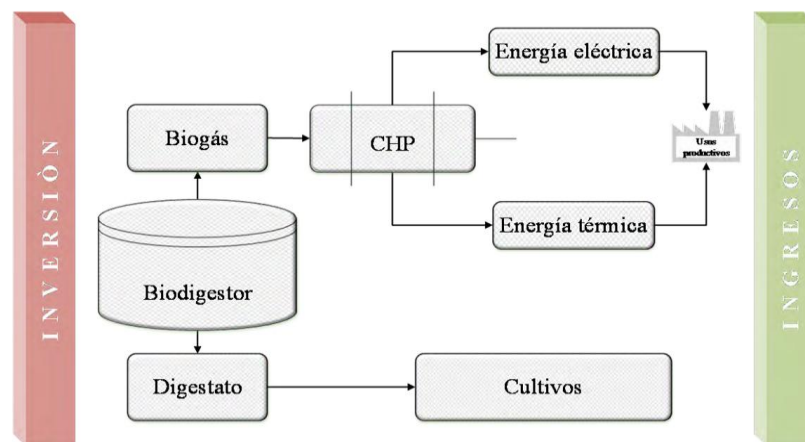
fructosa y azúcares, otro producto que relaciona este proceso es el biodiesel, con la diferencia de que su fuente proviene de la transformación de aceites vegetales o grasas animales (Sierra Rubio & Diaz Rubio, 2014).

Adicionalmente, el biogás y el biol se generan a partir de residuos agroindustriales como el excremento de animales y los desechos agrícolas, los cuales son procesados en biodigestores, este proceso se lleva a cabo por medio de la digestión anaeróbica que comprende las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis, permitiendo la transformación del material orgánico en biogás con un contenido de metano entre el 50 y 70%, las unidades productivas agroindustriales que utilicen esta alternativa permiten la generación de energía rentable y sostenible (Velásquez-Piñas et al., 2023a). En este contexto, Sierra Rubio & Diaz Rubio (2014, p. 26), describe los biocarburos de mayor predominancia agroindustrial junto con su fuente de origen, relacionando lo siguiente:

Etanol (destilado de azúcares y residuos), Metanol (destilado de la madera y pirolisis de vegetales y residuos), Metano (gas que resulta de la descomposición de residuos y fangos de depuradoras), Bioaceites (aceites extraídos de plantas como la soja, el girasol, la oliva, el cáñamo, etc.), Biodiesel (producto que se obtiene de la transesterificación de aceites vegetales). Las ventajas de la producción y utilización de los biocombustibles radican en la reducción de los impactos medio ambientales al provenir de una fuente biodegradable, según Cortés Sierra et al. (2010), este tipo de energía disminuye el efecto invernadero ocasionado por las emisiones de CO₂, en el estudio desarrollado indica que la emisión de CO₂ liberado por biocombustibles puede ser un 85% menor al producido por fuente fósiles, esta alternativa contribuye al mejoramiento de la rentabilidad de las unidades productivas agropecuarias, al ser proveedoras de energía con los mismos desperdicios y residuos que generan.

Dentro de estas alternativas, el biogás adquiere especial relevancia por su potencial energético y ambiental, de forma natural en entornos anaeróbicos se liberan entre 590 y 800 millones de toneladas de metano a la atmósfera cada año. Los sistemas de recuperación como los biodigestores aprovechan este fenómeno para transformarlo en un biocombustible compuesto por un 50% - 70% de metano, y un 30% - 50% de dióxido de carbono, con un poder calorífico entre 21 y 24 MJ/m³ (Bond & Templeton, 2011). Además, estos sistemas producen un subproducto conocido como digestato, compuesto en un 90% por biol (fracción líquida) y un 10% por biosol (fracción sólida). El biol, rico en nutrientes esenciales como amonio, fósforo, potasio y nitrógeno, representa una alternativa viable para la fertilización de cultivos y la recuperación de suelos degradados (Chontal Hernández et al., 2019). En la figura 2 se presenta un esquema representativo de este tipo de sistema.

Figura 2. Esquema de un sistema tradicional de producción de biogás



Nota. Elaborado a partir de Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio, por Velásquez-Piñas et al., 2023.

En este contexto, los autores Sánchez Roque et al. (2023), relacionan los litros de metano producido a partir de diferentes fuentes de residuos orgánicos, de acuerdo con el objeto de estudio, los residuos frutihortícolas generan 850 L de metano/kg de STV (Sólidos Totales Volátiles) y los restos de comida 396 L de metano/Kg STV. Diversos estudios destacan la eficiencia de los residuos de frutas y verduras (FVW) como sustrato altamente biodegradable, debido a su elevado contenido de materia orgánica y humedad, no obstante, cuando se emplean estos sustratos de manera aislada, la producción de biogás no alcanza su rendimiento máximo, ya que el exceso de compuestos fácilmente fermentables genera desbalances en la estabilidad del sistema. En contraste, al integrarse con otros compuestos como el bagazo de caña (SB) en una proporción de 70% FVW y 30% SB, se alcanzó una producción acumulada de aproximadamente 2,7 L en un periodo de 30 días, lo que representó un incremento de hasta 79% (Vats et al., 2019). De forma similar, la combinación de FVW (cáscaras de manzana, plátano y zanahoria) con lodos de depuradoras municipales (MSS), incrementó el volumen acumulado de biogás hasta en 19,5% y la producción total de metano en 15,2% respecto a la digestión de MSS en solitario, acompañado de una reducción aproximada del 71% en las concentraciones de H_2S , mejorando así la calidad del biogás generado (Azevedo et al., 2025). Seriki et al. (2025), coinciden en que la digestión individual favorece la acumulación de ácidos grasos volátiles limitando el contenido de metano ($\approx 23-27\%$), al co-digerirse con lodos primarios, el rendimiento mejora notablemente, alcanzando hasta $225,65 \text{ mL gVS}^{-1}$ de biogás (cantidad de biogás en mililitros producida por cada gramo de sólidos volátiles presentes en el sustrato) y 71,1% de metano. Estos resultados confirman que los residuos de frutas y verduras constituyen un co-sustrato altamente eficiente, capaz de optimizar tanto el rendimiento energético como la estabilidad y composición del biogás en procesos de digestión anaerobia, su mayor potencial se

materializa mediante la co-digestión, que optimiza la relación carbono-nitrógeno, favorece la actividad microbiana y asegura condiciones de mayor estabilidad para la generación sostenida de biogás.

En concordancia, el aprovechamiento de los biorresiduos puede orientarse hacia distintos fines, como la producción de compost, la generación de biomasa y la obtención de biocombustibles (en particular, biogás). Entre estas alternativas, la digestión anaeróbica, especialmente cuando se combina con estrategias de co-digestión, se posiciona como una de las opciones más prometedoras, al integrar la gestión de residuos con la generación de energía renovable y biofertilizantes, contribuyendo de manera directa al cumplimiento de los objetivos de la economía circular.

La transición energética en Colombia: retos y oportunidades para los biorresiduos.

La matriz energética de Colombia se caracteriza por una alta dependencia de fuentes fósiles, según Rincón-Velásquez & Castiblanco-Rozo (2021), la matriz energética colombiana tiene una participación del 76% de energía fósil, 12% hídrica, 11% biomasa (leña y bagazo) y otras renovables, como la eólica y el biogás, tienen una participación marginal.

En este contexto, los biorresiduos emergen como una alternativa estratégica, de acuerdo con un estudio realizado por la UPME en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en el 2018, se identificaron 17 tipos de biomasa residual con potencial para la generación de biogás en el país, a partir de estas fuentes, se estimó un potencial teórico de producción de biogás de 149.436 TJ/año (Terajulios/año) y un potencial técnico de 53.554 TJ/año, provenientes de residuos pecuarios, agrícolas, del

sector alimentario y de residuos generales (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2024).

La producción de bioenergías, aunque actualmente concentrada en la caña de azúcar y la palma (con 14 MW -Megavatios- generados en 2021), podría ampliarse significativamente mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos. Estudios recientes proyectan que, con tecnologías como los biodigestores anaeróbicos, podría incrementar significativamente la producción de energía renovable, se estima un potencial de generación de biogás de hasta 11 TWh (teravatio hora) a partir de residuos agrícolas (bagazo) y 1,7 TWh de residuos ganaderos, con un potencial inmediato de 1,4 TWh anuales (OECD, 2023).

Este panorama se alinea con las proyecciones oficiales, que señalan que para 2034 Colombia podría contar con 24,15 GW (gigavatios) de capacidad instalada en energías limpias, la hidroeléctrica seguiría siendo la fuente predominante (15,3 GW), seguida por la eólica (4,56 GW), la solar fotovoltaica (4 GW), la biomasa (350 MW) y el biogás (11 MW), lo que permitiría que las energías renovables representen cerca del 79 % de la matriz nacional (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2024).

En síntesis, la transición energética en Colombia plantea retos asociados a la dependencia de fuentes fósiles, pero también abre una ventana de oportunidad para aprovechar los biorresiduos como fuente renovable de energía y como insumo agrícola. Este doble beneficio contribuye tanto a la diversificación energética como a la consolidación de la economía circular.

Marco normativo.

A continuación, se presenta el marco normativo en Colombia relacionado con la producción de biocombustibles, el cual establece los lineamientos técnicos, ambientales y de política pública que regulan su desarrollo y aplicación.

Compromisos internacionales. El 12 de diciembre del 2015 se llevó a cabo la convención de la ONU sobre el cambio climático COP 21 de París, 196 partes establecieron acuerdos para combatir el cambio climático y acelerar las acciones para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono, los esfuerzos por parte de los países firmantes están centrados para el año 2020 en estrategias de desarrollo a largo plazo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2015). Colombia emitió la Ley 1844 del 2017 ratificando su adhesión al Acuerdo de París, comprometiéndose a limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 grados Celsius, reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero - GEI y la implementación de acciones que permitan la adaptación a los efectos del cambio climático, la Ley le permite a Colombia participar en las negociaciones de la COP con voz y voto, el acceso a recursos financieros y tecnológicos internacionales para cumplir con los objetivos climáticos, y asegurar la participación de Colombia en la Estrategia Nacional de Reducción de Emisiones debidas a la Deforestación y Degradación Forestal (REDD+) (Congreso de la República de Colombia, 2017).

Estrategia nacional. En el capítulo VI de la ley 1753 en coordinación con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, se formuló una política de crecimiento verde de largo plazo, dentro de sus estrategias incluye el diseño de programas que contribuyan al desarrollo sostenible y aporten al crecimiento verde, los ministerios de

Hacienda, Agricultura y Desarrollo Rural, Minas y Energía, Transporte, Salud y Protección Social, Vivienda, Ciudad y Territorio y Comercio, Industria y Turismo, formularán e implementarán planes sectoriales de *adaptación al cambio climático y la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono*, con metas de reducción de emisión de GEI a corto plazo (año 2020) y mediano plazo (2025 o 2030), adicionalmente, se crea el Registro Nacional de Reducción de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero – GEI quien reglamentará la reducción y remoción de emisiones (Congreso de la República de Colombia, 2015). Esta política se complementa con el CONPES 3700 de 2011 donde se establece una estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia, mediante la coordinación de esfuerzos multisectoriales para mitigar los efectos del cambio climático y promover un desarrollo bajo en carbono, que permitan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y fomentar la resiliencia climática (Departamento Nacional de Planeación, 2011).

Transición Energética y Fuentes Renovables. El Plan Nacional de Desarrollo PND (2022 – 2026) prioriza las estrategias e iniciativas relacionadas con la transición energética y el impulso a las energías renovables promoviendo una diversificación energética de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), como la solar, eólica, biomasa, geotermia y mareomotriz; fomenta la creación de comunidades que puedan generar, comercializar y usar energía renovable, cerrando brechas energéticas y mejorando las condiciones de vida (Departamento Nacional de Planeación, 2022). Complementando estas estrategias, la Ley 1715 del 2014, regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, bajo los compromisos de reducción de las emisiones de GEI establecidos en el acuerdo de París,

esta Ley busca diversificar la matriz energética del país, establece mecanismos para llevar energía renovable a zonas no interconectadas, incluye un apartado de beneficios tributarios y arancelarios para proyectos de energías renovables que incentiven la inversión y el desarrollo tecnológico (Congreso de la República de Colombia, 2014). A su vez, la Ley 2099 de 2021 modificó y adicionó varias disposiciones de la Ley 1715 de 2014, introduciendo un enfoque más amplio hacia la transición energética, incluye medidas para la reactivación económica y la diversificación del mercado energético, establece un marco para identificar y priorizar proyectos energéticos estratégicos, facilitando su desarrollo y ejecución, introduce el concepto de hidrógeno verde como una fuente de energía renovable, incentivando su producción y uso (Congreso de la República de Colombia, 2021).

Producción y Comercialización de Biocombustibles. La Ley 697 de 2001 tiene como objetivo principal fomentar el uso racional y eficiente de la energía (URE) y promover la utilización de energías alternativas como una estrategia para garantizar el desarrollo sostenible del país, buscando garantizar el crecimiento económico y el bienestar social sin agotar los recursos naturales ni deteriorar el medio ambiente (Congreso de la República de Colombia, 2001). Conjuntamente, La Ley 939 de 2004, incentiva la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en motores diésel, mediante la producción de oleaginosas para productos como el biodiésel, bioetanol y biometanol, concediendo beneficios tributarios (Congreso de la República de Colombia, 2004); como refuerzo de esta estrategia el CONPES 3510 de 2008 establece los lineamientos para promover la producción de biocombustibles en Colombia como una oportunidad de crecimiento económico de acuerdo con la demanda a nivel internacional, para ese año la participación del mercado de biocombustible era del

1%, y se proyectaba para el año 2030 una participación el 4%, dentro del documento se incentiva el desarrollo de cultivos como la palma de aceite y caña de azúcar para la producción de biocombustibles, reducir la dependencia de combustibles fósiles, establece criterios para garantizar que la producción de biocombustibles sea ambientalmente responsable e introduce incentivos económicos para fomentar la inversión en el sector de biocombustibles (Departamento Nacional de Planeación, 2008).

La Responsabilidad Social Empresarial (RSE).

En la actualidad los inversores y stakeholders coinciden que los modelos de negocios emergentes deben estar direccionados bajo los aspectos económico, social y ambiental, el concepto de Responsabilidad Social Empresarial se refiere a la acción voluntaria de ciertas obligaciones por encima de los deberes legales, como consecuencia de las catástrofes ambientales y comportamientos antiéticos, buscando la armonía entre la operatividad de las empresas, la sociedad y el medio ambiente (Dalla Costa & Persson, 2020), tomando de referencia a Bajo Sanjuán et al. (2013), de forma propositiva la RSE es la oportunidad para que una empresa sea cada vez mejor, siendo una frase inspiradora para cualquier empresario que busque la mejora continua y que bajo su obligación adopte prácticas que le permita gestionar de forma adecuada los residuos que produce, cumpliendo con sus obligaciones sociales alineadas con la conciencia ambiental en los modelos productivos, ejerciendo un control en la emisión de sus procesos, como parte del compromiso global para hacer frente al cambio climático.

Una herramienta para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero es la medición de la huella de carbono, la cual determina el índice de CO₂, metano, óxido de nitrógeno y todos los clorofluorocarbonos emitidos a la atmósfera, derivados de las actividades de producción o consumo de bienes o servicios, el control de este tipo de

métricas son valoradas y recompensadas a nivel mundial al estar alineadas con los ODS de Naciones Unidas, un ejemplo de esta iniciativa es la certificación del programa Carbón Zero de Nueva Zelanda, la cual consiste en realizar un inventario de las emisiones de gases de efecto invernadero, y convertir estos números rojos en actividades que generen una “huella ecológica” (Cáceres Quevedo, 2018). Independiente del tamaño de una organización, cada unidad productiva genera impacto positivo y negativo, los cuales pueden ser multiplicadores en un ambiente intercomunicado como es el actual, por lo tanto, un cambio en la cultura organizacional es una oportunidad y desafío para fomentar el aporte individual o colectivo hacia la sostenibilidad ambiental y la justicia social, mediante el postulado de “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades” (Sánchez Guevara & Martínez Galvis, 2018), siendo una oportunidad para el posicionamiento de las empresas frente a las exigencias de un consumidor más informado y consciente del cuidado del planeta y de sus hábitos de consumo.

La sostenibilidad organizacional.

Debido a los efectos generados por el cambio climático proveniente del modelo económico lineal, cobra mayor relevancia el goodwill que relaciona la rentabilidad del negocio con las prácticas verdes, en este sentido, la innovación sostenible fortalece la marca de las organizaciones, de acuerdo con Montesdeoca-Calderón et al. (2020), uno de los activos más importantes corresponde a la marca por medio de la diferenciación frente a los competidores, el autor relaciona que la reducción de residuos, la aplicación de compostaje, la mejora de los sistemas de reciclaje, la mejora de la eficiencia energética y el ahorro del agua hacen parte de ese fortalecimiento de marca; toda organización debe potencializar su marketing para un nicho de mercado creciente

caracterizado por una conciencia ambiental en su misionalidad, que de forma paralela demanda productos y servicios con menor impacto medio ambiental, estas prácticas comprometen a los colaboradores a mantener un esfuerzo en reducir las afectaciones ambientales, sensibilizando a su vez a los clientes por medio de un mensaje con enfoque sostenible que fortalece el capital de marca.

Los modelos de gestión empresarial enfrentan las consecuencias generadas por el cambio climático, en el sentido de que existe un mayor control de entes gubernamentales que exigen un racionamiento y uso adecuado de los recursos, en este contexto, la contabilidad ambiental juega un papel fundamental al guardar una relación simbiótica entre el crecimiento económico y la protección del medio ambiente, con el fin de garantizar el éxito en la aplicación de la economía circular (Puigvert & Ángel, 2023), a nivel organizacional los autores Christ & Burritt (2015), indican que la contabilidad de costos de flujo de materiales (MFCA, por sus siglas en inglés) es una herramienta que permite lograr la mayor productividad con un menor impacto ambiental, se basa sobre el costeo de flujos de materiales y energía, así como su costeo en la generación de residuos y emisiones. La estrategia organizacional relacionada con la Contabilidad de Costos en consonancia con principios de sostenibilidad, permite determinar el impacto en los resultados financieros, operativos, y por ende una visión holística en la rentabilidad de las inversiones enfocadas a la reducción de la huella de carbono, donde se incluye factores como el retorno de la inversión por la actividad misional, la reducción de costos asociados con prácticas ambientalmente responsables, los beneficios tributarios relacionados con el cumplimiento normativo a nivel ambiental, permitiendo una gestión integral de los modelos de negocios sostenibles al cumplir con los KPIs relacionados con la eficiencia en el uso de recursos, la minimización de desperdicios y la reducción de la huella de carbono (Carrera Erazo & Andrade Amoroso, 2024). Este tipo de estrategia

incursiona a la organización en la creciente y predominante vertiente de la economía circular, siendo un distintivo de marca, proporcionando un reconocimiento en el mercado por implantar prácticas de preservación del medio ambiente, es por ello que las unidades de transformación que generan biorresiduos pueden considerar una alternativa económica, ambiental y socialmente viable el desarrollar modelos productivos para el aprovechamiento de los residuos generados en la operación.

La gestión de biorresiduos en Colombia refleja tanto una problemática ambiental crítica como una oportunidad de transformación productiva y energética. Su aprovechamiento no solo permite mitigar impactos negativos asociados al cambio climático y la disposición ineficiente de residuos, sino también fortalecer la transición hacia una matriz energética más diversificada y sostenible.

A través de políticas públicas, marcos normativos, innovación tecnológica, Responsabilidad Social Empresarial (RSE) y sostenibilidad organizacional, los biorresiduos pueden convertirse en un recurso estratégico para avanzar en la economía circular, al tiempo que aportan al cumplimiento de los compromisos internacionales en materia de reducción de emisiones y transición energética.

En este sentido, el presente marco teórico establece los fundamentos conceptuales y contextuales que sustentan esta monografía, orientada a explorar y proponer alternativas viables para el aprovechamiento sostenible de los biorresiduos, con énfasis en su potencial como insumo energético y motor de desarrollo sostenible en Colombia.

Hipótesis

La problemática de la disposición inadecuada de residuos orgánicos en centrales de abastos puede abordarse desde la valorización de esos residuos mediante técnicas de producción de biogás.

Metodología

El enfoque metodológico de esta monografía se fundamenta en actividades orientadas a cumplir el objetivo general: *“Evaluar a partir de información secundaria el potencial de producción de biogás a partir de diferentes biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos.”*

Para ello, se recopiló y analizó la información específica sobre la cantidad de alimentos desperdiciados en la Central de Abastos más grande del país - Corabastos S.A., ubicada en la ciudad de Bogotá.

Su alcance incluyó la recolección de datos secundarios sobre los tipos y cantidades de biorresiduos disponibles en Corabastos, y la identificación de procesos de digestión anaerobia aplicables y estimación del rendimiento energético según parámetros técnicos reportados en la literatura, con la finalidad de considerar el biogás como una alternativa de energía alineada con las iniciativas de la transición energética del país. El análisis fue realizado bajo la siguiente metodología:

Revisión de Literatura y Datos. Se realizó una revisión como fuente primaria en la literatura disponible relacionada con el tema de investigación, que incluya información acerca del tipo de desperdicio que se genera en las unidades de comercialización de alimentos, la identificación y caracterización de residuos orgánicos y su poder calorífico para la producción de biocombustibles, la estimación del potencial de generación de

biogás mediante un proceso de producción anaeróbico donde se analice el tipo de materia orgánica utilizada y la tecnología empleada, y demás datos que estén disponibles en la literatura científica.

Análisis de Datos Secundarios. Recopilación y análisis de datos secundarios proveniente de entidades gubernamentales y organizaciones que relacionen literatura técnica y académica sobre la generación de biogás, impactos socioeconómicos y ambientales, y políticas energéticas globales.

Instrumentos. Para el levantamiento de información secundaria se usaron las bases de datos académicas disponibles en la Universidad EAN, como Proquest, E- Libro, Mendeley, Science Direct, Scopus, que permitan el acceso a estudios, informes y postulados científico. Complementariamente, se consultaron informes institucionales y literatura técnica de entidades como DANE, FAO, UAESP, entre otros.

A partir de información secundaria, se llevó a cabo un análisis comparativo de diversas alternativas de tratamiento para la producción de biogás, utilizando como fuente los diferentes biorresiduos generados en la Central de Abastos – Corabastos S.A.

Enfoque y alcance de la investigación. De acuerdo con los objetivos planteados en la presente monografía, el estudio adoptó un enfoque descriptivo, integrando un análisis cuantitativo y cualitativo a través de información secundaria para obtener una comprensión integral del fenómeno estudiado, enfocada en la evaluación de la producción de biogás a partir de distintos tipos de biorresiduos mediante indicadores medibles, permitiendo una comparación objetiva entre alternativas de tratamiento. El alcance de la investigación comprendió la identificación y caracterización a partir de

información secundaria de los biorresiduos más adecuados para la producción de biogás en la Central de Abastos – Corabastos S.A.

Diseño de investigación. El diseño de la investigación es de índole descriptivo, basado en la recopilación, análisis y presentación de los datos, el estudio pretendió responder la pregunta de investigación respecto al desperdicio de alimentos y el tratamiento de estos biorresiduos para su aprovechamiento, es por ello, que los métodos de medición utilizados tienen una connotación de diseño no experimental transversal, correspondiente a la recolección de información por medio de la revisión bibliográfica que se realizó en un solo momento del tiempo proporcionando un diagnóstico inicial sobre el manejo de biorresiduos y su potencial energético para la producción de biogás.

Técnica de Análisis de la Información.

Dado el enfoque descriptivo y la naturaleza del estudio sobre la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en la comercialización de alimentos en Bogotá, las técnicas de análisis de información se estructuraron de la siguiente manera:

Análisis Cualitativo. Para los datos no numéricos relacionados con las percepciones, prácticas y políticas:

Análisis de contenido:

Se utilizó para extraer y analizar la información por parte de los diferentes autores y postulados revisados.

- Juicio de expertos:

Se implementó una fase de validación de resultados mediante un panel de expertos del sector académico. Este proceso tuvo como finalidad construir una perspectiva crítica y consensuada sobre las alternativas de producción de biogás

planteadas a partir de los postulados técnicos referenciados en la revisión bibliográfica.

El diseño de la validación incluyó:

- Selección del panel experto: Conformado por cuatro docentes de la Universidad Ean, cuyas líneas de investigación se relacionan directamente con energías renovables, bioenergía, gestión de residuos, economía circular y políticas públicas sobre transición energética. La diversidad de sus enfoques aportó amplitud y profundidad a las recomendaciones de este trabajo, las cuales se realizaron a partir del análisis de la información secundaria.
- Aplicación de una entrevista semiestructurada a los expertos: Se presentó los resultados preliminares del estudio, y se aplicó entrevistas semiestructuradas que incluyeron preguntas abiertas que permitieron recopilar valoraciones cualitativas y sugerencias complementarias relacionadas con:
 - ✓ Viabilidad técnica de los métodos analizados: Condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos.
 - ✓ Relevancia ambiental y potencial escalabilidad de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos.
 - ✓ Factores contextuales que podrían limitar o potenciar la implementación del tratamiento de residuos orgánicos para la producción de biogás en centrales de abastos.
- Procesamiento y análisis de datos: Los datos obtenidos se analizaron identificando patrones recurrentes y categorías relevantes, con el fin de consolidar una visión crítica y experta sobre las alternativas de producción de biogás propuestas, enriqueciendo los hallazgos preliminares y proporcionando bases para futuras aplicaciones prácticas o estudios piloto.

Variables

Para lograr un análisis detallado y riguroso en el marco de esta investigación, se definieron las siguientes variables de estudio, orientadas a evaluar el potencial del biogás como alternativa sostenible y replicable en la gestión de residuos orgánicos generados en unidades de comercialización de alimentos. Se hace énfasis en que estas variables fueron analizadas a partir de información secundaria y no se midieron experimentalmente.

La referencia principal para esta monografía fue Corabastos S.A., la central de abastos más representativa del país por su volumen y diversidad de residuos.

Tabla 1.

Variables de estudio reportadas en la literatura

Variables	Definición conceptual	Definición operacional
Cantidad de alimentos desperdiciados	Pérdida de alimentos en etapas de distribución, comercialización y consumo que no alcanzan su destino final.	Revisión de fuentes estadísticas (DNP, UAESP, FAO), análisis documental y datos oficiales de generación de residuos en Corabastos.
Tipo de residuos orgánicos generados en comercializadoras de alimentos	Clasificación de residuos biodegradables como frutas, verduras, hortalizas y cítricos, cuya composición permite su procesamiento anaeróbico.	Consulta bibliográfica técnica, estudios de caracterización de residuos según humedad, contenido energético y presencia de inhibidores como limoneno.
Poder calorífico de los biorresiduos generados	Cantidad de energía potencial que puede ser extraída de los residuos orgánicos para generar biogás.	Revisión de estudios comparativos donde se hayan aplicado métodos calorimétricos, digestión anaeróbica y análisis del potencial energético (producción por unidad de sólidos volátiles, Potencial Bioquímico del Metano -BMP-).

Cantidad de biogás producido por tipo de residuo orgánico	Volumen de biogás generado en relación con el tipo específico de biorresiduo, considerando eficiencia y estabilidad del proceso.	Síntesis de investigaciones técnicas que evalúan rendimiento según tipo de sustrato (frutas, verduras, cítricos), proceso de refinado, composición del metano y tiempo de producción.
---	--	---

Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de la Investigación

1. Aprovechamiento de Biorresiduos: Revisión Técnica y Conceptual para la Producción de Biogás

La presente investigación aborda el potencial energético de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, tomando como referencia la central de abastos más representativa del país - Corabastos S.A. A partir de una revisión conceptual y técnica sobre biomasa, digestión anaerobia y producción de biogás, se plantea una caracterización detallada de los residuos orgánicos con miras a su valorización energética. El estudio explora los tipos de biomasa disponibles, los factores que afectan la eficiencia de los procesos anaeróbicos y las propiedades fisicoquímicas del sustrato orgánico como determinantes de la producción de metano. Este enfoque permite visibilizar la importancia de transformar desperdicios en soluciones energéticas sostenibles, y fomenta la integración de tecnologías limpias en sectores clave del abastecimiento alimentario.

Se parte del concepto de Biomasa que hace referencia a un conjunto de materia orgánica para la obtención de energía, originada por un proceso biológico donde su contenido energético procede del sol fijado en los vegetales mediante la fotosíntesis, el cual transforma el dióxido de carbono y agua en carbohidratos, siendo la fuente subyacente de los biocombustibles (Romero Salvador, 2010), las fuentes de energía de biomasa más importantes corresponden a la madera, cultivos agrícolas y sus subproductos, residuos del procesamiento de alimentos, residuos sólidos urbanos, desechos de animales, plantas acuáticas y las algas (Demirbas et al., 2009), la biomasa no contribuye al aumento de los Gases de Efecto Invernadero – GEI, teniendo en cuenta que al producirse la combustión de la biomasa, el carbono que se libera al ambiente es el equivalente al absorbido por las plantas, generando un balance de carbono neutro, por

tal motivo, cobra interés el uso de la energía dispuesta en la biomasa para la producción de bioenergía.

Al evaluar la eficiencia de producción de biocombustibles respecto al uso de los recursos naturales, los autores Quintero González y Quintero González (2015), señalan el potencial energético de la biomasa (bioenergía) a nivel mundial referenciando que los biocombustibles producidos a partir de la caña de azúcar y el sorgo dulce presentan una mejor relación en términos de sostenibilidad en cuanto al uso eficiente de la tierra, recursos de agua, nitrógeno, energía, y bajo uso de plaguicidas, esta relación se presenta en la tabla 2.

Tabla 2.

Relación de la sostenibilidad en la producción de biocombustibles.

Materia prima	País/Región	Relación sostenibilidad		
		Alta	Media	Baja
Aceite de palma	Sudeste asiático	+		
Sorgo dulce	China	+		
Maíz	Estados Unidos			+
Trigo	Noroeste de Europa			+
Remolacha azucarera	Noroeste de Europa		+	
Yuca	Tailandia		+	
La Colza	Noroeste de Europa		+	
Soja	Estados Unidos		+	

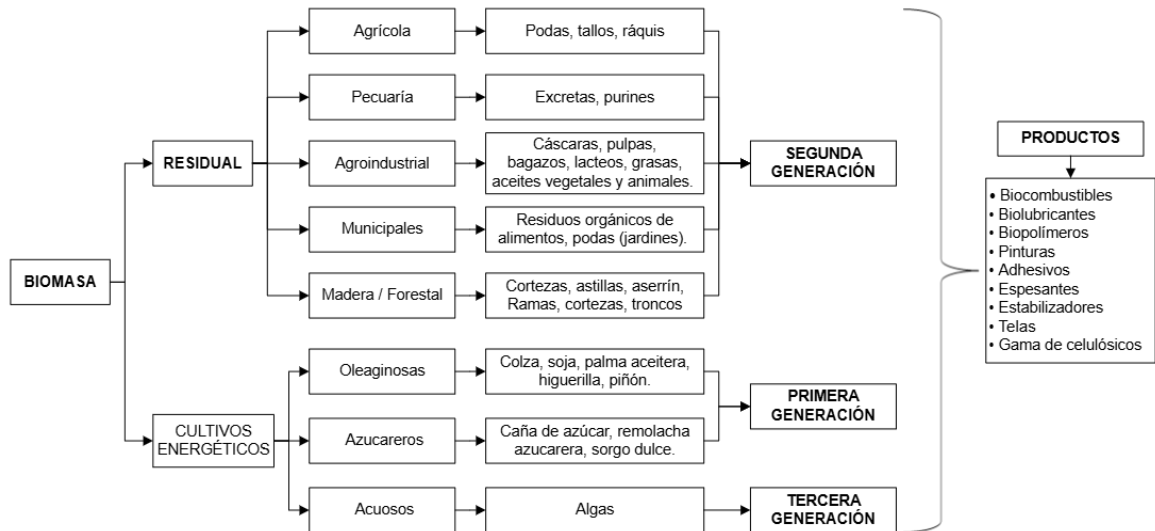
Nota. Adaptado de Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano, por Quintero González & Quintero González, 2015.

La biomasa proviene de un entorno natural o de transformaciones industriales, y se clasifica en tres generaciones, la biomasa de primera generación hace referencia a los cultivos destinados a la seguridad alimentaria tales como: Maíz, banano, soja, palma aceitera, arroz, entre otros, en esta categorización la sostenibilidad es baja debido al uso

del suelo/agua/nutrientes para la producción tanto de biocombustibles como de cultivos destinados al consumo humano, generándose una competencia por el aprovechamiento de los recursos naturales; la biomasa de la segunda generación tiene un amplio espectro de sostenibilidad al efectuar el aprovechamiento de residuos de tipo: domésticos, industriales, sólidos municipales, agrícolas, forestales y animales, permitiendo controlar las emisiones de GEI por medio de la producción de biocombustibles; la biomasa de tercera generación corresponde al aprovechamiento de algas y micro algas que son totalmente renovables y su potencial energético es mayor en comparación a las biomásas detalladas anteriormente (Vargas-García et al., 2021), para efectos del presente estudio la investigación estará dirigida a la producción de biogás a partir de la materia orgánica de la segunda generación. En la Figura 3 se efectúa una clasificación de la biomasa de acuerdo con su origen y tipo de generación, la producción de biocombustibles puede provenir de diferentes sustratos de tipo orgánico, su eficiencia depende de las características fisicoquímicas del sustrato y el reactor utilizado que permita una optimizar la digestión anaeróbica:

Figura 3.

Clasificación de la biomasa.



Nota. Adaptado de Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión, por Vargas-García et al., 2021.

Una vez abordado el concepto de biomasa como fuente renovable de energía contenida en residuos orgánicos, se incorpora el análisis del proceso de digestión anaerobia (DA) como tecnología clave para su valorización. La Digestión anaeróbica (DA) es un proceso que implica la degradación y estabilización de materiales orgánicos en un entorno sin presencia de oxígeno (anaeróbico), produciendo una mezcla entre dióxido de carbono y metano (biogás), durante la DA intervienen microorganismos termófilos que tienen como característica la estabilización de desechos, la destrucción de virus y bacterias patógenas, y una mejor deshidratación de los lodos (Chen et al., 2008). Los microorganismos anaerobios son inhibidos por sustancias presentes en los residuos afluentes tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados y cianuro, y también inhibidos en los subproductos metabólicos por el amoníaco, sulfuro y ácidos

grasos volátiles (Khanal, 2008), siendo compuestos tóxicos que generan una disminución en la eficiencia de la digestión anaeróbica de los microorganismos mesófilos y termófilos reduciendo su capacidad de producción de metano (Arriagada et al., 2019), el amoníaco es uno de los productos de la hidrólisis que se forman durante la degradación de los compuestos orgánicos, las concentraciones inferiores a 200 mg/L de amoníaco permite un correcto crecimiento de los microorganismos anaeróbicos, concentraciones de nitrógeno amoniacal total de 4,92 y 5,77 g/l pueden reducir la producción de metano de hasta un 39% y un 64%, respectivamente (Shihwu & Tao, 2003). La DA proveniente de los residuos agrícolas pueden contener un alto contenido de pesticidas y plaguicidas, estos compuestos tienen una alta tasa residual y pueden ser dañinos para los metanógenos (bacterias anaerobias) y actuar como inhibidores de la DA (Chakraborty et al., 2002). En general, la inestabilidad de un proceso de tratamiento anaeróbico generará fallas en el digestor y este se reflejará en una caída en la tasa de producción de metano, una caída de pH y un aumento en la concentración de ácidos grasos volátiles. Las principales causas de esta inestabilidad corresponden a una sobrecarga en la alimentación, la entrada de un inhibidor de crecimiento microbiano anaeróbico y un control inadecuado de temperatura (Ramírez-Rivas, 2013). En consecuencia, los procesos anaeróbicos se ven afectados por las variaciones en las condiciones ambientales, la condición anaeróbica establece temperaturas entre los 35 a 40°C para microorganismos mesófilos y 55°C para los termófilos (Haandel & Lettinga, 1994, como se cita en Khanal, 2008, p. 27) en un sistema donde co-existen bacterias acidógenas (productoras de ácido) y metanógenas (productoras de metano), el pH óptimo para estos debe oscilar entre 6,8 y 7,4, procurando mantener un pH neutro (Khanal, 2008).

Como resultado directo de la digestión anaeróbica, se genera el Biogás, un biocombustible gaseoso producido durante la digestión anaeróbica de sólidos orgánicos biodegradables, el metano presente en el biogás le confiere el valor de combustible y su porcentaje de composición varía de acuerdo con el tipo de sustrato como se indica en la tabla 3, el biogás crudo requiere un proceso de refinado para retirar las impurezas como CO, H₂O, H₂S (Rincón-Velásquez & Castiblanco-Rozo, 2021), al efectuar este proceso de refinado, este se enriquece obteniendo biometano mejorando la composición química y su poder calorífico (tabla 4), según (Haandel & Lettinga, 1994), dentro de las impurezas del biogás crudo se incluye:

- Dióxido de carbono: Ocasiona una dilución en el contenido energético y disminución del poder calorífico del biogás.
- La humedad: Puede provocar condensación en las tuberías del enfriador del digester. Al mezclarse con el sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, se forma ácido sulfúrico, este compuesto acelera la corrosión y el deterioro de las piezas, reduciendo la vida útil de los componentes del sistema. Además, restringe el flujo del gas y provoca una pérdida de presión en las tuberías.
- Siloxanos: Son compuestos volátiles generados durante la digestión anaeróbica. Su presencia en el biogás, al combustionar, puede provocar la formación de depósitos de sílice en motores y turbinas, afectando su eficiencia y causando daños.

Tabla 3.

Rendimiento de biogás y metano por tipo de sustrato.

Tipo de sustrato	Producción de biogás por unidad de masa degradada	CH₄ en el biogás	Referencia
Carbohidrato	0,42 m ³ /Kg	50 %	(Nwokolo et al., 2020)
Proteína	0,50 m ³ /Kg	50 %	
Lípidos	1,01 m ³ /Kg	70 %	
Desperdicio de alimentos	110 m ³ / tonelada FM	-	
Maíz	0,25–0,40 m ³ /kg DM /0,56–0,65 Nm ³ / kg VS	0,25 – 0,45 %	(Ngabala & Emmanuel, 2024)
Residuos de frutas	74 m ³ /tonelada FM	-	
Mezcla de mazorcas de maíz	660-680 Nm ³ toneladas ⁻¹ VS	-	
Residuos de papa	36 – 42 m ³ /Tonelada FM	58 – 65%	(Ćurčić et al., 2025)
Residuos de fruta	10 – 20 m ³ /Tonelada FM	58 – 65%	

FM = Materia fresca, DM = Masa seca, VS = Sólidos volátiles

Nota. Adaptado de Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production, por Nwokolo et al., 2020; Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion-an alternative energy source, por Ngabala & Emmanuel, 2024; y Assessing Biogas Production Potential from Organic Waste and Livestock Byproducts in a Serbian Municipality: Implications for Sustainable Food Systems, por Ćurčić et al., 2025.

Tabla 4.

Composición química del biogás posterior a la refinación.

	Compuesto	Biogás	Biometano	Referencias
Gas principal	Metano (CH ₄)	50 – 75%	> 97%	
	Dióxido de carbono (CO ₂)	25 – 45%	< 3%	(Rincón-Velásquez & Castiblanco-Rozo, 2021)
Contaminantes	Oxígeno (O ₂)	2 – 4%	> 0,5%	
	Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	< 0 – 6.000 ppm	< 5 ppm	
	Agua	3,92%	-	(Gómez-Camperos et al., 2022)
Propiedades	Poder Calórico Mj/m ³	29,17	-	

Nota. Adaptado de Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión, por Rincón-Velásquez & Castiblanco-Rozo, 2021; y Desarrollo de un sistema de supervisión de las variables de temperatura, presión y pH en un Biodigestor Anaeróbico, por Gómez-Camperos et al., 2022.

2. Identificación y caracterización de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos

En el marco operativo y ambiental de las centrales de abasto en Colombia, estas se consolidan como espacios estratégicos para la comercialización de alimentos, cumpliendo funciones logísticas clave dentro del sistema alimentario nacional. Sin embargo, su alta dinámica comercial también conlleva una significativa generación de residuos orgánicos, lo que plantea la necesidad de implementar soluciones sostenibles para su gestión. En este contexto, el aprovechamiento de la biomasa - entendida como la materia orgánica con capacidad energética que puede transformarse en bioenergía - cobra especial relevancia al ofrecer oportunidades de valorización mediante tecnologías limpias. Entre estas, la digestión anaerobia se destaca como un proceso eficiente que

transforma residuos biodegradables en biogás, un biocombustible renovable que contribuye simultáneamente a la mitigación de gases de efecto invernadero y al avance de la transición energética en el país. Esta perspectiva permite reconvertir desperdicios generados en fuentes alternativas de energía, aportando valor agregado a los sistemas de manejo de residuos en infraestructuras críticas como Corabastos S.A., donde se concentran volúmenes significativos de productos no conformes con alto contenido energético.

Como parte del desarrollo del primer y segundo objetivo de la presente investigación, a continuación, se presenta la información temática relevante que incluye la caracterización de las centrales de abasto, la identificación de los tipos de biorresiduos y su potencial calorífico para la producción de biogás.

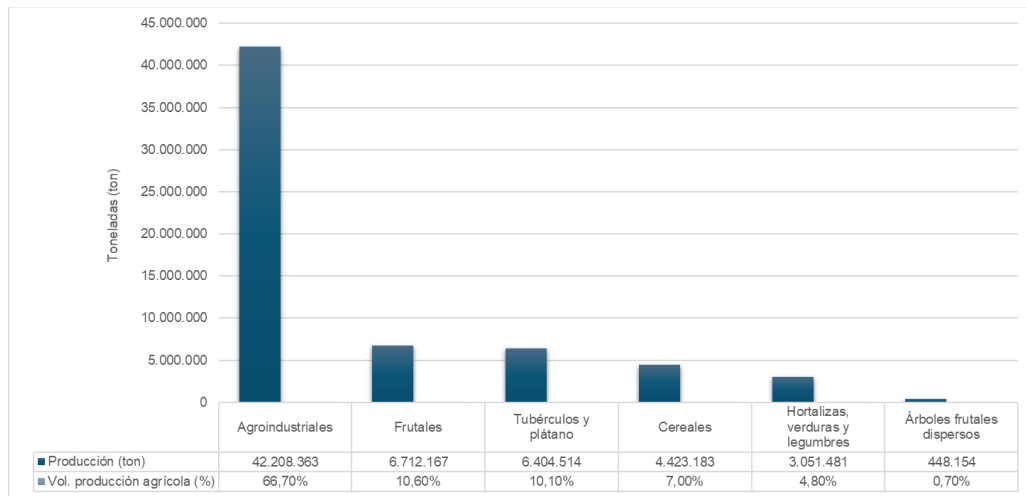
2.1. Caracterización de las centrales de abasto en el país.

Las centrales de abastos mayoristas de alimentos tienen como función comercializar los alimentos provenientes de unidades productivas ubicadas en el sector rural con el fin de abastecer las necesidades urbanas, la “Red Nacional de Centrales Abastos” actualmente está conformada por 12 centrales de abastos mayoristas en el país y su objetivo incluye la disminución del impacto ambiental en manejo de residuos sólidos y orgánicos, tratamiento de aguas residuales y energías renovables bajo el enfoque de la economía circular (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2024). Según la Encuesta Nacional Agropecuaria – ENA, para el reporte del 2019 la producción total de alimentos fue de 63.247.863 toneladas, con un uso total del suelo de 50.102.269 hectáreas, en la figura 4 se discrimina la producción por tipo de cultivo, se destaca que el 66,70% de los cultivos son destinados para el

procesamiento de alimentos, el restante de cultivos hace parte de los productos frescos y mínimamente procesados que son comercializados en el interior del país.

Figura 4.

Producción de alimentos por grupo de cultivos (toneladas)



Nota. Tomado de Encuesta Nacional Agropecuaria, por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2019.

En la Tabla 5 se presentan las toneladas promedio mensuales de alimentos comercializados en 2023, con un volumen de 288.000 toneladas al mes en Corabastos S.A., ubicado en la ciudad de Bogotá. Los lugares de origen y destino de los productos incluyen la Sabana de Bogotá, Cundinamarca, así como mercancías recibidas y distribuidas en 27 de los 32 departamentos del país (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2024).

Tabla 5.

Mercados de la Red Nacional de Centrales de Abastos.

Departamento	Ciudad	Nombre del mercado	Toneladas promedio/mes 2023
Antioquía	Medellín	La Mayorista	216.000
Atlántico	Barranquilla	Granabastos	16.560
Boyacá	Tibasosa	Comprooriente	21.600
Cesar	Valledupar	Mercabastos	2.880
Cundinamarca	Bogotá	Corabastos S.A.	288.000
Huila	Neiva	Surabastos	38.400
Meta	Villavicencio	Abastos del Llano	8.091
Norte de Santander	Cúcuta	Cenabastos S.A.	17.520
Quindío	Armenia	Mercar	93.936
Risaralda	Pereira	Mercasa	79.200
Santander	Bucaramanga	Centro Abastos	63.144
Valle del Cauca	Cali	Cavasa	845.331

Tomado de La Red Nacional de Centrales de Abastos (2023) como se cita en Rol de los mercados mayoristas de alimentos en los sistemas alimentarios, por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2024.

De acuerdo con la información disponible de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP (2025), el relleno sanitario doña Juana recibe los residuos sólidos urbanos de Bogotá, D.C., y de los municipios de Cundinamarca como Cáqueza, Choachí, Chipaque, Fosca y Gutiérrez, Ubaque y Une, en promedio 684 viajes diarios son realizados por los vehículos de transporte de residuos lo que equivale a 6.368 toneladas/día o 194.000 toneladas/mes de desechos son ingresados al relleno sanitario. En Corabastos se estima una producción de residuos es de 150 toneladas/día de excedentes, de estas el 20% son de origen inorgánico y el 80% de origen orgánico, para el 2023 se generaron 34.728,33 ton. de excedentes orgánicos recuperados, 66,22 ton. de excedentes aprovechables recuperados, 5440 ton. de excedentes no aprovechables

(ordinarios) y 4,79 ton. de excedentes especiales (aceite vegetal), (Corporación de Abastos de Bogotá S.A.- Corabastos, 2023).

El 60% de los residuos generados en Corabastos corresponden a residuos orgánicos, equivalentes a 76,2 ton/día, compuestos por 40% verduras, 40% hortalizas y 20% frutas, el 96,7% de estos residuos son aprovechados en procesos de compostaje, fertilizantes líquidos, energía, alimentación pecuaria, el 40% restante de los residuos corresponde a residuos sólidos como papel, periódico, plástico y vidrio (Siatoya Ramírez & Arce Portilla, 2019), la principal causa de la generación de desperdicios se debe a la utilización de empaques no apropiados para el transporte de alimentos frescos, generando un alto grado de rechazo por producto no conforme originado por el maltrato de los alimentos durante las etapas de cargue-transporte-descargue, el nivel de pérdidas oscila entre el 5 y 7% (Consorcio NAM Ltda & VELZEA Ltda., 2000), en términos de aprovechamiento se describe la siguiente caracterización de los residuos orgánicos:

... la densidad promedio de los residuos es de 0.31ton/m³. La humedad varía entre 80 y 92%, el contenido de carbono está entre 43.5 y 49.8%, los fenoles varían entre 14.3 y 316 mg/kg., los nitratos entre 372 y 18,040 mg/kg., los nitritos entre 5.2 y 32.8 mg/kg., y nitrógeno total varía entre 1.1 y 2.1%. Los sólidos totales varían entre un 8 y 20%, y los sólidos volátiles entre 78.4 y 89.7%. Los sulfatos entre 6,580 y 93,120 mg/kg., los sulfitos entre 177 y 1,200 mg/kg. El pH (medido en campo) varía entre 6.1 y 7. (p. 5).

Los comerciantes de Corabastos han unificado acciones en contra del desperdicio y pérdida de los alimentos como parte de las estrategias del segundo ODS “Hambre Cero”, esta estrategia permitió que para el año 2023 se donaran 2741 toneladas de alimentos para comunidades vulnerables acogidas en el banco de alimentos impactando directamente en la disminución de los desechos orgánicos, dentro de los alimentos

donados se incluye: Panela; leche, pan, azúcar, aceite, papa; naranja, comida para animales, café, plátano, agua y bebidas (Corporación de Abastos de Bogotá S.A.- CORABASTOS, 2023).

2.2. Tipos de residuos en centrales de abasto en Bogotá y su contenido energético.

Los combustibles están compuestos por carbono, y su energía se mide a partir de su reacción con el oxígeno, liberando calor; esta energía se expresa en unidades como joules por kilogramo (J/kg) o calorías por gramo (cal/g). En los compuestos orgánicos, el contenido energético es proporcional a la cantidad de enlaces carbono-carbono (C-C) en su estructura, siendo generalmente inferior en comparación a los combustibles fósiles (Núñez Camargo, 2012). Teniendo en cuenta el potencial calorífico de los residuos orgánicos, las centrales de abasto de Bogotá representan un impacto relevante de energía perdida en el entendido de que sus biorresiduos son dispuestos en el relleno sanitario doña Juana, desaprovechando un desarrollo biotecnológico como alternativa de producción de combustible sostenible. A continuación, se relaciona algunos tipos de biorresiduos generados en centrales de abasto y su relación con el potencial calorífico:

2.2.1. Residuos cítricos.

El uso de este tipo de residuos se convierte en un reto importante a nivel bioquímico debido a que contienen compuestos inhibidores de la fermentación, como es el caso del limoneno, es el componente principal de los aceites esenciales de los cítricos, con una concentración que varía entre el 30% y el 90%, según la especie, se encuentra principalmente en la cáscara (pericarpio) de estos frutos (Simas et al., 2015), de acuerdo con el postulado de Hernandez et al. (2014), la actividad antimicrobiana del limoneno se

asocia a su comportamiento lipofílico, lo que permite desnaturalizar proteínas y capas lipídicas, alterando las propiedades y la función de la pared celular, afectando de forma directa los componentes intracelulares y provocando la muerte celular de los microorganismos (mencionado por Ribeiro et al., 2023). Los autores Lohrasbi et al. (2010), indican que la cáscara de los residuos cítricos contiene entre un 0,8% a 1,6% de D-limoneno, por lo tanto, se requiere un pretratamiento adicional para reducir el contenido del D-limoneno por debajo del 0,05% para la producción de biocombustibles a partir de este sustrato, el estudio propone extraer el limoneno de forma previa a los procesos de fermentación y digestión anaeróbica por medio de un proceso de hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C para romper las estructuras celulares y liberar el aceite esencial de estos residuos, evaporándose el 99% del contenido del limoneno, los sólidos restantes de la hidrólisis se direccionan a un digestor anaeróbico, luego de 20 días se obtiene una mezcla del 41% de metano y 50% de CO₂. Los autores Pourbafrani et al. (2010), utilizan el mismo método para la eliminación del limoneno para evitar inhibiciones en la producción de biogás, el proceso desarrollado consistió en el tratamiento de los residuos con ácido sulfúrico al 0.5% v/v, sometiéndolos a temperaturas entre 130 y 170°C, posteriormente, el material hidrolizado es descargado en un tanque de expansión, lo que provoca una rápida reducción de presión y la evaporación del limoneno en un 99%, tras la hidrólisis, los residuos cítricos son sometidos a digestión anaeróbica durante 50 días a 55°C, lo que permite la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás, de este proceso se obtuvo 0.363 litros de metano (CH₄) por cada gramo de sólidos volátiles (VS) presentes en el sustrato, consolidando este método como una alternativa eficiente y sostenible para la valorización de residuos agroindustriales. En la tabla 6 se detallan los resultados de estos dos estudios:

Tabla 6.

Producción de biogás con eliminación de limoneno

Método de eliminación del limoneno	Tiempo de producción biogás	Cantidad producida	Composición de biogás	Referencias
Hidrolisis ácida y explosión de vapor con ácido sulfúrico al 0.5% v/v	20 días	44,8 m ³ CH ₄ / tonelada de residuos	41% CH ₄ 50% CO ₂	(Lohrasbi et al., 2010)
	50 días	45 m ³ CH ₄ / tonelada de residuos	41% CH ₄ 59% CO ₂	(Pourbafrani et al., 2010)

Nota. Adaptado de Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products, por Lohrasbi et al., 2010, y Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes, por Pourbafrani et al., 2010.

Una alternativa para optimizar el proceso de producción de biogás y metano a partir de residuos cítricos corresponde a un pretratamiento biológico basado en la acción de hongos *Phanerochaete chrysosporium*, *Trichoderma polysporum*, *Penicillium citrinum*, *Trichoderma viride*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus niger* y *Rhizopus stolonifer*, para descomponer los residuos cítricos antes de la digestión anaeróbica, con este pretratamiento se eliminó inhibidores como el limoneno, se incrementó el pH de 1,8 a 5,6, se favoreció la degradación de la celulosa y se redujo los sólidos volátiles; el método consistió en la mezcla de los residuos cítricos en un biodigestor anaeróbico, los microorganismos descompusieron la materia orgánica mediante procesos anaeróbicos, transformando el ácido acético en metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y trazas de hidrógeno. El estudio refleja que las muestras sin pretratamiento tuvieron una baja producción de biogás debido al pH ácido (1,8) y a la presencia de inhibidores, el uso de un solo hongo mostró mejoras moderadas en biogás, pero aún con limitaciones en

términos de estabilidad. Las combinaciones de hongos fueron mucho más efectivas, especialmente *Phanerochaete chrysosporium* junto con *Aspergillus niger*, permitiendo una mayor producción de biogás y metano en menor tiempo, demostrando que el pretratamiento biológico y la optimización de la fermentación pueden mejorar significativamente la producción de biogás y metano a partir de residuos cítricos, ofreciendo una solución sostenible para la gestión de estos desechos y la generación de bioenergía (Su et al., 2016). En la siguiente tabla se relacionan estos resultados:

Tabla 7.

Producción de biogás con pretratamiento biológico

Tipo de pretratamiento	Biogás producido	Metano producido	Tiempo de producción
Control	12,23 ml/g	9,34 ml/g	22 días
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> + <i>Trichoderma polysporum</i>	50,92 ml/g	41,51 ml/g	16 días
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> + <i>Penicillium citrinum</i>	60,25 ml/g	33,17 ml/g	18 días
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> + <i>Trichoderma viride</i>	48,01 ml/g	37,52 ml/g	14 días
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> + <i>Aspergillus oryzae</i>	40,09 ml/g	57,23 ml/g	16 días
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> + <i>Aspergillus niger</i>	66,23 ml/g	55,27 ml/g	8 días
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> + <i>Rhizopus stolonifer</i>	42,07 ml/g	45,48 ml/g	8 días

Nota. Adaptado de Enhancement of biogas and methanization of citrus waste via

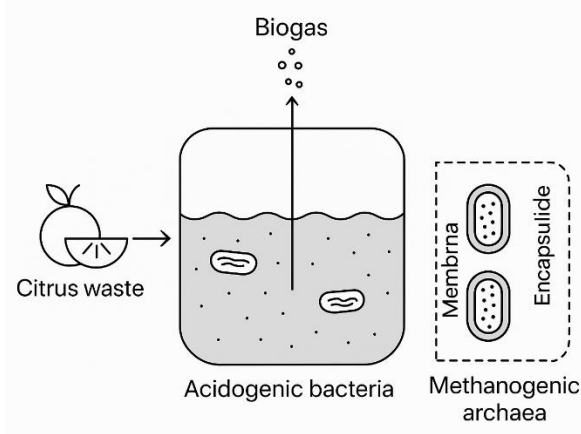
biodegradation pretreatment and subsequent optimized fermentation, por Su et al., 2016.

Otra estrategia efectiva para inhibir el D-limoneno durante la digestión anaeróbica fue propuesta por los autores Wikandari et al. (2014), desarrollaron un estudio haciendo uso de un reactor anaerobio semi-continuo con dos tipos de microorganismos: Bacterias acidogénicas libres en el medio líquido, y Arqueas metanogénicas encapsuladas en

membranas hidrofílicas de PVDF (polivinilideno difluoruro), esta configuración permitió que las bacterias libres degradaran los residuos cítricos en compuestos solubles (ácidos grasos volátiles), que luego atraviesan la membrana y son convertidos en metano por las arqueas encapsuladas que permanecen protegidas del efecto tóxico del limoneno, la producción de biogás se dio bajo condiciones termofílicas a 55°C, durante 83 días (figura 5). La carga orgánica se incrementó de forma gradual, el proceso comenzó con una carga de 0,3 kg Sólidos volátiles/m³/día durante el periodo de arranque, aumentando progresivamente hasta alcanzar 3 kg Sólidos volátiles/m³/día al final de los 83 días de operación, finalizado el proceso, por cada kilogramo de sólidos volátiles (SV) digeridos en el biodigestor, se generaron 0,33 metros cúbicos normales de metano (CH₄), con un contenido de metano del 79%, de forma comparativa, el reactor convencional (sin membrana) mostró una producción significativamente menor, con solo 0,05 Nm³/kg SV con un 49% del contenido de metano, debido a la inhibición causada por el limoneno.

Figura 5.

Diagrama del funcionamiento del reactor anaerobio con membranas:



Nota. Adaptado de Biogas production from citrus waste by membrane biorreactor, por Wikandari et al., 2014.

El uso de membranas hidrofílicas en biorreactores representa una solución eficaz y eficiente para la digestión anaerobia de residuos cítricos con compuestos inhibidores como el D-limoneno. Esta estrategia permite simular un proceso de dos etapas dentro de un solo reactor, optimizando la separación funcional entre acidogénesis y metanogénesis sin aumentar la complejidad técnica. Al impedir el paso del limoneno hacia las arqueas metanogénicas mediante la exclusión selectiva de la membrana, se garantiza la protección y estabilidad de los microorganismos productores de metano, lo cual aumenta el rendimiento del biogás y mantiene la calidad del proceso incluso en condiciones de alta carga orgánica. Este enfoque no solo mejora la viabilidad técnica del tratamiento de residuos cítricos, sino que también ofrece una ruta más sostenible y energéticamente favorable frente a pretratamientos agresivos.

2.2.2. Residuos de frutas y verduras.

Estos residuos cuentan con un potencial de aprovechamiento alto debido a su biodegradabilidad, a continuación, se relacionan diversos estudios acerca de la producción de biogás respecto al tipo de residuos. Los autores Gómez et al. (2006), analizaron el proceso de digestión anaeróbica y codigestión de lodos primarios con una mezcla de frutas y verduras, evaluando varios parámetros clave como sólidos totales, sólidos volátiles, pH y producción diaria de biogás, la composición de la mezcla para la codigestión tuvo las siguientes proporciones: Se utilizó una combinación de plátano (10%), manzana (10%), naranja (10%), col (35%), papa (25%), pan (8%) y papel (2%), con la adición del lodo primario el cual aportó el 22% del contenido total de sólidos, el rendimiento de los digestores se evaluó en condiciones de alta mezcla (HM), baja mezcla (LM) y estática (SC), bajo la presente nomenclatura ST: Sólidos totales, SV: Sólidos

volátiles, PS: Lodos primarios, FVFMSW: Fracción de frutas y verduras de residuos sólidos urbanos, en la siguiente tabla se describen los resultados:

Tabla 8.

Resultados de la digestión anaeróbica y codigestión con una mezcla de frutas y verduras

Parámetro	Digestión de lodo primario (PS)	Codigestión de lodo primario con frutas y verduras (PS + FVFMSW)	Eficiencia
Condición: Alta mezcla (HM) 200 rpm	ST: 6% SV: 70% pH ≈ 7.0 Biogás: 0.5 - 1.5 L/día	ST: 6% SV: 92% pH ≈ 7.0 Biogás: 0.7 - 2.4 L/día	Homogenización (+) Consumo energético (+)
Condición: Baja mezcla (LM) 80 rpm	ST estable SV ≈ 70% pH ≈ 7.0 Biogás: 0.8 - 1.5 L/día	ST estable SV ≈ 92% pH ≈ 7.0, Biogás: 1.2 - 2.4 L/día	Equilibrio entre rendimiento y ahorro energético
Condición: Estática (SC) Sin agitación	ST estable SV ≈ 70% pH ≈ 7.0 Biogás: 0.5 - 1.0 L/día	ST estable SV ≈ 92% pH ≈ 7.0 Biogás: 1.0 - 1.7 L/día	Reducción en eficiencia por falta de actividad entre sustrato y microorganismo (sin homogenización)

Nota. Adaptado de Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate, por Gómez et al., 2006.

Se concluye, que la codigestión generó más biogás porque la mezcla de frutas y verduras aportó una mayor cantidad de sólidos volátiles (SV), generando una mayor materia orgánica para descomponer, situación que mejoró la relación carbono-nitrógeno (C:N), favoreciendo un equilibrio óptimo para la actividad microbiana y evitando la acumulación de ácidos grasos volátiles, que pueden inhibir la producción de metano, en comparación con la digestión anaeróbica la cual se lleva a cabo con un solo tipo de sustrato (lodo primario).

Los autores Mosos Martínez et al. (2012), evaluaron el potencial energético del biogás a partir de residuos de frutas y verduras, durante el estudio se descartó elementos cocidos o procesados, la concentración de la materia orgánica biodegradable presente en el sistema por cada litro de solución utilizada en el análisis fue de 2g de sólidos volátiles por litro (SV/L), Se empleó el método de Potencial Bioquímico de Metano (BMP), el cual permite evaluar la biodegradabilidad de un sustrato mediante el seguimiento de la producción acumulada de metano, para ello, la muestra se incubó en condiciones anaerobias dentro de un medio químicamente definido, lo que garantiza la reproducibilidad del ensayo y la caracterización energética del residuo, del estudio en mención se relacionan los siguientes hallazgos:

Tabla 9.

Resultados del potencial energético del biogás por el método BMP.

Aspectos	Resultados
Tipo de sustrato	Residuos crudos de frutas y verduras (sin cocción ni procesamiento).
Concentración evaluada	2 g de sólidos volátiles por litro (SV/L).
Producción de biogás	560 ml de biogás por gramo de sólidos volátiles digeridos.
Contenido de metano	65% en promedio.
Potencial energético	4.5 kW-h por kg de sólidos volátiles digeridos.

Remoción de sólidos volátiles	48% después de 60 días.
pH del sistema	pH \approx 7.0

Nota. Adaptado de Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira, por Mosos Martínez et al., 2012.

Una variable importante para la eficiencia de la producción de biogás a partir de los residuos de frutas y verduras es la temperatura. Cardona Alzate et al. (2004), evaluaron el comportamiento de la producción de biogás bajo condiciones mesofílicas y criofílicas, se establece que las condiciones mesofílicas permiten obtener un mayor volumen de biogás en un menor tiempo, aproximadamente 4 litros de biogás/kg de residuos procesados, igualmente, los autores Martínez et al. (2014), evaluaron el efecto de la temperatura en la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, incluyendo restos de papa, frutas y verduras, las condiciones de operación correspondieron a un rango mesofílico de 25 a 40 °C, bajo un experimento de 90 días utilizando un bioreactor tipo batch, durante el estudio, se obtuvo una producción promedio de 182 ml/día de metano, lo que equivale a 16.38 L en todo el periodo de evaluación, considerando que el biogás está compuesto aproximadamente en un 60% por metano, se estima que la producción total de biogás alcanzó cerca de 27.3 L, se concluye que la temperatura tiene una relación directa con la estabilidad del proceso, y el mantener una temperatura constante optimiza la producción de biogás, en la tabla 10 se relacionan los resultados.

Tabla 10.

Eficiencia de la producción de biogás bajo la variable de temperatura

Condición	Tiempo producción Biogás	Volumen de biogás	Referencias
Criofílica (18 °C)	85 días	11,73 L	(Cardona Alzate et al., 2004)
Mesofílica (37 °C)	25 días	12,8 L	
Mesofílica (30 - 35 °C)	90 días	27,3 L	(Martínez et al., 2014)

Nota. Adaptado de Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado, por Cardona Alzate et al., 2004, y Efecto de la temperatura en la producción de biogás en un Bioreactor tipo Batch a través de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos orgánicos, por Martínez et al., 2014.

Considerando que el rango mesofílico ofrece una mayor eficiencia en la producción de biogás, resulta fundamental que los biodigestores sean diseñados con materiales de aislamiento térmico que permitan conservar una temperatura estable durante el proceso, esta condición contribuye directamente a optimizar el rendimiento operativo, ya que reduce de forma significativa las pérdidas de calor (cerca del 60%) entre las paredes del biodigestor y el entorno (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016). En complemento, Gómez-Camperos et al., (2022) desarrollaron un estudio experimental con un biodigestor anaeróbico, en el cual se monitorearon variables críticas para la descomposición controlada de la biomasa (temperatura, presión y pH). Tras 20 días de operación, se observó un incremento térmico de 14 °C a 36 °C, un pH estable de 6,5 y un aumento de presión de 3 a 9,5 kPa, evidenciando un aumento de temperatura y presión dentro del sistema, siendo condiciones favorables para la actividad microbiana y la generación de biogás.

El tratamiento de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia ha cobrado relevancia como alternativa limpia y sostenible. Sin embargo, los biorresiduos como frutas y verduras presentan desafíos técnicos cuando se procesan en sistemas convencionales, debido a su variabilidad, contenido de humedad y posibles inhibidores. Para superar estas limitaciones, los autores Chatterjee & Mazumder (2024) y Zhang et al. (2017), desarrollaron una fase experimental a partir de un método de digestión anaerobia híbrida en tres fases, que permitió un control más preciso del proceso microbiano y mejora considerablemente la producción de biogás. Este sistema separa físicamente las etapas metabólicas del proceso anaerobio en tres unidades:

1. Hidrólisis: Se rompen moléculas complejas como celulosa y proteínas en componentes solubles como azúcares y aminoácidos.
2. Acidogénesis: Los productos hidrolizados se transforman en ácidos grasos volátiles (AGV), hidrógeno y CO₂.
3. Metanogénesis: Los compuestos generados previamente se convierten en metano gracias a la acción de arqueas especializadas.

En la siguiente tabla se relaciona los resultados comparativos de estos estudios:

Tabla 11.

Producción de biogás a partir de un método de digestión anaerobia híbrida en tres fases

Sustrato utilizado	Tipo de sistema	Producción de biogás	Contenido de CH₄	Referencias
Frutas y hortalizas	Digestor anaeróbico compacto de tres etapas (Hidrólisis, la acidogénesis y	0,65 L/g de Sólidos volátiles (aprox.)	58 – 62%	(Chatterjee & Mazumder, 2024)

Arroz, verduras y alimentos cocidos	la metanogénesis)	0,307 L/g de sólidos volátiles	52 – 67%	(Zhang et al., 2017)
--	----------------------	--------------------------------------	----------	-------------------------

Nota. Adaptado de Valorization of fruit and vegetable waste in a novel three-stage hybrid anaerobic digester for enhanced biogas production: Performance study and microbial community analysis, por Chatterjee & Mazumder, 2024, y Three-stage anaerobic digester for food waste, por Zhang et al., (2017).

Este diseño modular permite adaptar el pH, la carga orgánica y el tiempo de retención de cada etapa, favoreciendo el crecimiento y la actividad de los microorganismos involucrados de acuerdo con su condición biológica, mejorando la calidad del biogás al elevar el porcentaje de metano y reducir compuestos indeseables como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), paralelamente, favorece la proliferación de microorganismos clave como *Methanosarcina*, capaces de convertir múltiples sustratos en CH_4 . Este tipo de producción representa una solución tecnológica avanzada para maximizar la producción de biogás a partir de biorresiduos, especialmente en contextos donde se generan desechos heterogéneos y difíciles de separar.

3. Condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos

En consonancia con el tercer objetivo de esta investigación y con base en los postulados teóricos y técnicos referenciados, se plantean las condiciones óptimas que favorecen la producción eficiente de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. En el contexto del desarrollo sostenible y las estrategias de transición energética, el aprovechamiento de la fracción orgánica residual mediante digestión anaerobia representa una oportunidad relevante para transformar desperdicios

en energía renovable. Este capítulo establece los parámetros técnicos, bioquímicos y operativos que inciden directamente en el rendimiento del proceso, tales como la composición del sustrato, la relación carbono/nitrógeno, la temperatura del reactor, el pH, el tiempo de retención y la carga orgánica aplicada. Dichos factores, cuidadosamente seleccionados según evidencia científica y estudios previos, configuran el marco de referencia para la implementación de sistemas de valorización energética adaptados a los residuos disponibles en plataformas como Corabastos S.A.

3.1. Caracterización de los sustratos.

Los biorresiduos de Corabastos S.A., compuestos principalmente por frutas, verduras y hortalizas, muestran una alta biodegradabilidad y contenido energético útil para la generación de biogás, con valores de humedad del 80–92%, pH de 6.1–7.0, Sólidos volátiles (SV) de 78.4–89.7% (Consortio NAM Ltda & VELZEA Ltda., 2000), compuesto por 40% verduras, 40% hortalizas, 20% frutas (Siatoya Ramírez & Arce Portilla, 2019), con una producción estimada para el año 2023 de 34.728 ton. de desechos orgánicos recuperados (Corporación de Abastos de Bogotá S.A.- CORABASTOS, 2023); se destaca la necesidad de incluir un tratamiento previo a los residuos cítricos por contener limoneno, compuesto que inhibe la metanogénesis (Lohrasbi et al., 2010).

3.2. Condiciones ambientales óptimas.

Para la producción de biogás se propone condiciones de temperatura orientadas a un tipo de digestión mesofílica, con un rango térmico entre 35 y 40°C (Martínez et al., 2014), y un pH con un rango óptimo de operación entre 6.8 y 7.4, favoreciendo la actividad de bacterias acidogénicas y metanogénicas (Khanal, 2008). Debe monitorearse

de forma continua para evitar acumulación de ácidos volátiles que alteran la eficiencia del sistema (Ramírez-Rivas, 2013).

3.3. Pretratamientos del Sustrato.

Una preparación adecuada del sustrato es fundamental para minimizar la presencia de compuestos antimicrobianos que interfieren con la actividad microbiana responsable de la metanogénesis. En este sentido, los pretratamientos físicos, químicos y biológicos se consolidan como estrategias esenciales para optimizar la degradación de la materia orgánica, neutralizar inhibidores y asegurar una producción de biogás estable y sostenida. Estos procesos mejoran la disponibilidad de la fracción biodegradable, contribuyen al equilibrio del pH del sistema, disminuyen la concentración de sustancias tóxicas y favorecen la generación de metano, fortaleciendo así la sostenibilidad ambiental y la viabilidad técnica de las propuestas desarrolladas en esta investigación.

Tabla 12. *Métodos de eliminación de inhibidores*

Método	Producción biogás	Tiempo de producción	Referencias
Hidrólisis ácida + explosión de vapor	44,8 ml/g	20 – 50 días	(Lohrasbi et al., 2010)
Pretratamiento biológico con hongos (<i>P. chrysosporium</i> + <i>A. niger</i>)	66,23 ml/g	8 – 18 días	(Su et al., 2016)
Reactor con membranas (PVDF)	0,33 metros cúbicos normales de metano (CH_4), equivalente a \approx 418 ml/g de biogás	83 días	(Wikandari et al., 2014)

Nota. Adaptado de Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products, por Lohrasbi et al., 2010, Enhancement of biogas and methanization of citrus waste via biodegradation pretreatment and subsequent

optimized fermentation, por Su et al., 2016, y Biogas production from citrus waste by membrane biorreactor, por Wikandari et al., 2014.

El aprovechamiento de biorresiduos para la producción de biogás en centros de comercialización de alimentos exige condiciones controladas que favorezcan la actividad microbiológica dentro del digestor, tales como: La adecuada selección del sustrato, junto con el control de parámetros como pH, temperatura y carga orgánica, así como la implementación de pretratamientos y sistemas de digestión segmentada, permite alcanzar una producción eficiente y ambientalmente segura. Estas condiciones son técnicamente replicables en Corabastos S.A., el principal centro de comercialización de alimentos de Bogotá, contribuyendo a la reducción del impacto de los residuos sólidos orgánicos en los rellenos sanitarios y al fortalecimiento de prácticas sostenibles en la gestión de residuos.

4. Validación de las condiciones óptimas propuestas para la producción de biogás

Este capítulo presenta los resultados del análisis cualitativo realizado a partir de entrevistas semiestructuradas a cuatro expertas en digestión anaerobia, quienes aportaron una visión crítica y especializada sobre los parámetros operativos, los pretratamientos recomendados, y las implicaciones ambientales y estratégicas tenidas en cuenta para la producción de biogás a partir de biorresiduos. Este ejercicio permitió consolidar categorías temáticas relevantes, identificar patrones recurrentes y enriquecer los hallazgos preliminares, aportando insumos para futuras aplicaciones prácticas y estudios piloto.

La selección de las participantes se realizó con base en su trayectoria académica y experiencia técnica en procesos de valorización energética, gestión ambiental y diseño

de sistemas de tratamiento biológico. A continuación, se describen sus perfiles profesionales:

- Experta 1:
Ana Katherine Diaz Duran
PhD. Ciencias Químicas
Entidad académica/institucional: Agrosavia - Universidad EAN
Cargo o rol técnico: Investigador posdoctoral.
- Experta 2:
Marie José Chéry
M.Sc. Ingeniería Ambiental
Entidad académica/institucional: Universidad Ean
Cargo o rol técnico: Profesora asociada.
- Experta 3:
Leidy Natalia Zapata Restrepo
PhD. Proyectos de investigación ambiental
Entidad académica/institucional: Universidad EAN
Cargo o rol técnico: Profesor asociada.
- Experta 4:
Johanna Karina Solano Meza
PhD. Ingeniería del Agua y Medioambiental
Entidad académica/institucional: Universidad EAN
Cargo o rol técnico: Profesora asociada

La diversidad de enfoques y especializaciones de las entrevistadas permitió abordar el objeto de estudio desde múltiples dimensiones técnicas y estratégicas, fortaleciendo la validez del análisis y aportando recomendaciones aplicables al contexto de comercializadores urbanos de alimentos como Corabastos S.A. En las siguientes

secciones se presentan las categorías emergentes, los patrones identificados y las reflexiones clave derivadas de este proceso de validación experta.

4.1. Pertinencia técnica de los biorresiduos.

Las expertas entrevistadas coincidieron en la alta pertinencia técnica de los residuos orgánicos generados en Corabastos S.A., destacando su elevada biodegradabilidad, bajo contenido de lignina, alta humedad y baja carga de metales pesados o aditivos químicos. Estos atributos favorecen su sometimiento a procesos de digestión anaerobia, lo que valida la selección del sustrato como base del modelo propuesto Khanal (2008).

Además, se resaltó la importancia de realizar una selección adecuada de los residuos, especialmente aquellos con presencia de limoneno, compuesto inhibidor de la actividad microbiana.

Esta observación coincide con la realizada por Raposo et al. (2011), quienes sugieren que la inclusión de residuos cítricos dentro del sistema de biodigestión requiere una evaluación de la proporción en la mezcla para evitar concentraciones de limoneno que superen el umbral de tolerancia microbiana, la aplicación de pretratamientos que reduzcan el contenido de limoneno antes de la digestión, el uso de co-sustratos que diluyan el efecto inhibidor tales como estiércoles o lodos digeridos, y adaptar gradualmente el inóculo a la presencia de compuestos cítricos, favoreciendo la aclimatación de la comunidad microbiana. Adicionalmente, se debe considerar la exclusión de estos residuos si el objetivo del sistema o las condiciones operativas no permiten mitigar el efecto inhibidor.

4.2. Condiciones óptimas de operación.

Las condiciones operativas propuestas en la monografía fueron ampliamente validadas por las expertas:

- Temperatura mesofílica (35–40°C): Considerada confiable para garantizar la estabilidad biológica del proceso.
- pH óptimo (6.8–7.4): Rango ideal para el desarrollo de bacterias acidogénicas y metanogénicas.
- Monitoreo de parámetros críticos: Se recomienda implementar sistemas de control para temperatura, presión, pH y composición del biogás dentro de sistema de biodigestión.

Estas condiciones fueron reconocidas como estándares técnicos sólidos, sin embargo, para una caracterización completa es necesario incluir los sólidos volátiles y totales, demanda bioquímica de oxígeno, humedad, potencial bioquímico de metano, adicionalmente, se enfatizó la necesidad de mantener la estabilidad operativa, teniendo en cuenta que la microbiología del proceso es delicada y sensible a variaciones bruscas de condiciones, y que la vulnerabilidad a inhibidores (amoníaco, sulfuros, metales, ácidos grasos volátiles) implica que el personal a cargo de los sistemas de biodigestión debe reconocer síntomas tempranos y aplicar medidas correctivas antes de que se comprometa la producción de biogás.

4.3. Pretratamientos recomendados.

El planteamiento de las condiciones óptimas de producción de biogás contempla tres tipos de pretratamientos: físico, químico y biológico. Las expertas coincidieron en que el triturado se consolida como opción prioritaria por su simplicidad y efectividad. Los

procesos fisicoquímicos más complejos, como la hidrólisis ácida con vapor, o biológicos con hongos, pueden mejorar la eficiencia bajo condiciones de control especializado, pero su confiabilidad se reduce si el sistema carece de protocolos operativos y capacitación técnica para mitigar riesgos, a continuación, se presenta el nivel de confiabilidad de estos criterios por parte de la validación de las expertas:

Tabla 13.

Validación del tipo de pretratamiento por parte de las expertas.

Tipo de pretratamiento	Nivel de confiabilidad	Observaciones y condiciones
Triturado (físico)	Alto	Mejora superficie de ataque microbiano y homogeneiza la mezcla; fácil de implementar.
Hidrólisis ácida + vapor	Medio	Eficaz contra inhibidores como limoneno, pero con riesgo de subproductos tóxicos y corrosión; requiere diseño y control cuidadoso.
Biológico con hongos	Bajo – Medio	Potencialmente útil para degradar lignocelulosa, pero demanda tiempos de residencia altos y gran estabilidad operativa; más sensible a variaciones de proceso.
Ajustes fisicoquímicos	Medio - Alto	Útiles para controlar acidez de residuos cítricos y prevenir inhibiciones, pero su eficacia depende de control continuo.

Nota. Elaboración propia

4.4. Caracterización energética de los residuos.

A nivel general las expertas identificaron los siguientes criterios como fundamentales para evaluar el poder energético de los biorresiduos:

- Contenido de sólidos volátiles (SV).
- Relación carbono/nitrógeno (C/N) ideal (20:1–30:1) para evitar inhibiciones microbiológicas.

- Potencial bioquímico de metano (BMP).
- Alcalinidad.
- Relación inóculo/sustrato.

Estos parámetros permiten estimar el rendimiento energético del sistema, optimizar la mezcla de residuos y garantizar la estabilidad del proceso.

4.5. Recomendaciones estratégicas para la implementación.

Las expertas coincidieron en que el fortalecimiento del modelo de producción de biogás propuesto requiere una sinergia entre optimización técnica, articulación territorial y capacitación continua.

Desde el plano operativo, se recomienda implementar co-digestión planificada con estiércol bovino u otros residuos orgánicos para balancear la relación C/N, mejorar la carga microbiana y estabilizar el proceso; incorporar tecnologías de monitoreo y control en tiempo real que aseguren condiciones óptimas de temperatura, pH y carga orgánica; y aplicar protocolos de calidad del digestato conforme a normas reconocidas, como la NTC 5167, para garantizar su aprovechamiento como fertilizante orgánico en mercados agrícolas. Estos aspectos deben complementarse con protocolos de bioseguridad para el manejo seguro de insumos químicos (p. ej., ácido sulfúrico), el manejo biológico de hongos y el control de emisiones de metano y ácido sulfúrico.

En el plano estratégico, se recomienda establecer alianzas público-privadas que faciliten la distribución del biol y el aprovechamiento del biogás en redes locales. Asimismo, se propone articular el proyecto con programas de transición energética y con mecanismos de comercialización de créditos de carbono, fortaleciendo paralelamente la educación y capacitación técnica de todos los actores involucrados, desde la separación en la fuente hasta la valorización final, esta integración permite cerrar de manera

eficiente los ciclos de materia y energía, y contribuir de forma medible al cumplimiento de los objetivos de economía circular y transición energética.

4.7 Impacto ambiental y sostenibilidad.

El planteamiento de las condiciones óptimas para la producción de biogás fue validado como una alternativa eficaz con un impacto ambiental altamente positivo, dado que contribuye de manera significativa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), evita la disposición de residuos orgánicos en rellenos sanitarios y sustituye el uso de combustibles fósiles mediante la generación de biogás.

De forma complementaria, las expertas recomiendan la valorización del digestato como fertilizante orgánico, lo que permite cerrar ciclos de nutrientes y reducir la huella ecológica asociada a la producción de abonos sintéticos, fortaleciendo así los principios de economía circular.

No obstante, para garantizar la sostenibilidad integral del sistema, es indispensable implementar protocolos rigurosos de seguridad operacional y bioseguridad, asegurar el manejo responsable de insumos peligrosos y establecer mecanismos de control y mitigación de emisiones potenciales (incluyendo metano y H₂S).

Finalmente, se propone la realización de un análisis de ciclo de vida (ACV) que permita cuantificar con precisión la reducción de la huella de carbono, aportando evidencia objetiva sobre su contribución a la mitigación climática y su viabilidad ambiental a largo plazo.

5. Discusión de Resultados

Los hallazgos presentados sobre las condiciones óptimas para la producción de biogás evidencian una correspondencia directa entre la composición de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos y su rendimiento energético en procesos de digestión anaerobia. Esta relación refuerza la hipótesis central del trabajo: La problemática de la disposición inadecuada de residuos orgánicos en centrales de abastos puede abordarse desde la valorización de esos residuos mediante técnicas de producción de biogás.

En primer lugar, los resultados demuestran que la eficiencia energética está fuertemente influenciada por la naturaleza fisicoquímica del residuo. Los biorresiduos compuestos por frutas, hortalizas y verduras presentan sólidos volátiles superiores al 78%, humedad entre 80–92% y pH cercano a la neutralidad, condiciones que favorecen la actividad de bacterias metanogénicas (Consorcio NAM Ltda & VELZEA Ltda., 2000). Esta caracterización permite identificar de forma operativa que, al intervenir sobre la composición del residuo, se pueden predecir y mejorar los niveles de producción de biogás, lo cual valida una de las variables centrales del estudio.

Sin embargo, el caso de los residuos cítricos introduce un punto de tensión metodológica y técnica, debido a que el limoneno (compuesto lipofílico de acción antimicrobiana) inhibe la metanogénesis, afectando negativamente la producción de CH₄ (Pourbafrani et al., 2010). Este fenómeno obligó a analizar diversos métodos de pretratamiento (químicos, biológicos y mediante membranas) que logran eliminar o aislar el efecto del limoneno, como el uso de hongos especializados (Su et al., 2016) o membranas de PVDF que protegen las arqueas metanogénicas (Wikandari et al., 2014). El rendimiento energético en estos casos mostró mejoras significativas, con una

producción de hasta 418 ml/g de biogás, lo cual plantea una oportunidad de innovación para los sistemas tradicionales de digestión.

Además, se observa que las condiciones ambientales óptimas como la temperatura mesofílica entre 35 – 40°C y pH entre 6.8 – 7.4 no solo son compatibles con la degradación efectiva de los residuos, sino también replicables en entornos urbanos mediante el diseño adecuado de biodigestores. Este punto es clave para su implementación en Corabastos S.A., pues permite integrar tecnologías adaptadas al contexto local sin requerir infraestructura de alta complejidad.

En relación con la literatura científica, los datos obtenidos coinciden con estudios como los de Mosos Martínez et al. (2012), y Chatterjee & Mazumder, (2024), quienes corroboran que la codigestión y la segmentación funcional del digestor elevan la producción de metano al optimizar la actividad microbiana. La discusión aquí se amplía al considerar que la calidad del residuo, es decir, su proporción C:N, su grado de biodegradabilidad y su contenido de inhibidores puede ser una variable predictiva de éxito en proyectos de bioenergía urbana.

Los hallazgos obtenidos confirman que la caracterización fisicoquímica de los biorresiduos es un factor determinante para predecir y optimizar la producción de biogás. La validación experta de las condiciones óptimas como la temperatura mesofílica entre 35 – 40 °C, pH en el rango 6.8 – 7.4 y control de parámetros críticos, respalda su aplicabilidad en entornos urbanos como Corabastos S.A., donde la composición de los residuos de frutas, hortalizas y verduras favorece la actividad metanogénica. Sin embargo, la presencia de inhibidores como el limoneno en residuos cítricos obliga a implementar estrategias de mitigación, ya sea mediante pretratamientos físicos, químicos o biológicos, o a través de esquemas de cogestión, tal como sugieren Su et al. (2016) y

Raposo et al. (2011), para garantizar la estabilidad del proceso y maximizar su rendimiento energético.

Conjuntamente, en relación con los pretratamientos, la validación consolida que el triturado físico es la opción más confiable por su simplicidad y bajo costo, mientras que la hidrólisis ácida con vapor y los procesos biológicos con hongos ofrecen beneficios potenciales, pero su viabilidad depende de un control técnico especializado y protocolos estrictos de bioseguridad.

Desde una perspectiva ambiental y estratégica, las condiciones propuestas de producción de biogás tienen un potencial significativo para contribuir a la reducción de GEI, la sustitución de combustibles fósiles y la consolidación de un modelo de economía circular en centrales de abasto. A nivel contextual, los resultados adquieren relevancia en tanto permiten posicionar el aprovechamiento energético de biorresiduos como una estrategia compatible con las metas de economía circular y transición energética propuestas en el Plan Nacional de Desarrollo (Departamento Nacional de Planeación, 2022). Las centrales de abasto, al ser nodos críticos de generación de residuos, podrían incorporar modelos de biodigestión con triple impacto: económico (ahorro energético), ambiental (reducción de residuos y GEI), y social (fortalecimiento de prácticas sostenibles).

No obstante, la ausencia de normativas específicas para residuos agroindustriales urbanizados, los costos de tecnologías de refinamiento del biogás, y la necesidad de estructurar alianzas público-privadas para implementar estos sistemas son limitaciones que abren una ventana para futuras investigaciones que integren estudios de viabilidad técnico-económica y políticas de incentivos para biocombustibles no convencionales.

Conclusiones

La presente investigación permitió evaluar el potencial energético del biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, tomando como referencia la operación de Corabastos S.A. en Bogotá. A partir del análisis documental, técnico y validación experta, se logró dar respuesta a los objetivos específicos de la presente monografía, consolidando una alternativa viable y ambientalmente sostenible para la gestión de residuos orgánicos en entornos urbanos.

Se identificaron los principales tipos de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, destacándose frutas, verduras, hortalizas y cítricos como los más representativos. Estos residuos presentan una alta biodegradabilidad y disponibilidad constante, lo que los convierte en sustratos adecuados para procesos de digestión anaerobia. No obstante, se evidenció que los residuos cítricos requieren un tratamiento diferenciado debido a la presencia de limoneno, compuesto inhibidor de la actividad microbiana, lo que plantea retos técnicos para su aprovechamiento energético.

La caracterización fisicoquímica de los biorresiduos permitió establecer parámetros clave como el contenido de sólidos volátiles (78–89%), humedad (80–92%) y pH cercano a la neutralidad, los cuales hacen parte de las condiciones que favorecen la actividad metanogénica. Se documentó que el poder calorífico de estos residuos puede alcanzar hasta 4.5 kWh/kg de sólidos volátiles digeridos, con una producción de biogás superior a 560 ml/g en condiciones óptimas. Estos valores confirman el alto potencial energético de los residuos orgánicos generados en centrales de abasto.

Se propusieron las condiciones óptimas para la producción de biogás, incluyendo temperatura mesofílica (35–40 °C), pH entre 6.8 y 7.4, y la aplicación de pretratamientos físicos, químicos y biológicos según el tipo de residuo. El triturado se consolidó como el

pretratamiento más confiable por su simplicidad y efectividad, mientras que la hidrólisis ácida y el uso de hongos especializados mostraron resultados prometedores en la eliminación de inhibidores como el limoneno, aunque requieren control técnico especializado.

Se validaron las condiciones óptimas propuestas mediante entrevistas semiestructuradas a expertas en digestión anaerobia, quienes confirmaron la viabilidad técnica del modelo planteado. Se destacó la importancia de implementar sistemas de monitoreo continuo, protocolos de bioseguridad y estrategias de co-digestión para mejorar la eficiencia del proceso. Además, se recomendó la valorización del digestato como fertilizante orgánico y la articulación del proyecto con políticas de economía circular y transición energética.

La producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos representa una alternativa técnicamente viable y estratégicamente pertinente para enfrentar los desafíos del manejo de residuos en entornos urbanos. En particular, las centrales de abasto como Corabastos S.A. se consolidan como nodos críticos de generación de residuos orgánicos con alto potencial energético, cuya valorización mediante digestión anaerobia permite transformar desperdicios en energía renovable, fertilizantes orgánicos y prácticas sostenibles.

Esta alternativa solo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino que también promueve un impacto ambiental positivo al evitar la disposición de residuos en rellenos sanitarios, un impacto económico al generar ahorro energético y nuevos productos valorizables, y un impacto social al fortalecer la cultura de sostenibilidad y la articulación entre actores públicos y privados. La integración de tecnologías apropiadas, protocolos operativos y esquemas de capacitación técnica

permite replicar esta solución en otras centrales de abasto, posicionando el biogás como una herramienta clave para avanzar hacia una economía circular y una transición energética justa y descentralizada.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2015). *Cartilla para el manejo de residuos sólidos*. Secretaria General de La Alcaldía Mayor de Bogotá.
https://www.alcaldiabogota.gov.co/docsig/documentos/Proceso1/2210111-OT-051_Ant_30062016174816.pdf
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2023). *Programa Basura cero en Bogotá 2023*.
<https://oab.ambientebogota.gov.co/programa-basura-cero/>
- Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Arriagada, C. B., Sanhueza, P. F., Guzmán-Fierro, V. G., Medina, T. I., Fernández, K. F., & Roeckel, M. D. (2019). Efficient poultry manure management: anaerobic digestion with short hydraulic retention time to achieve high methane production. *Poultry Science*, 98(12), 6636–6643. <https://doi.org/10.3382/ps/pez516>
- Azevedo, A., Lapa, N., Moldão, M., Gominho, J., & Duarte, E. (2025). Fruit and vegetable wastes as co-substrates in anaerobic co-digestion: Effect of storage temperature on physicochemical properties and biogas production. *Energy Nexus*, 17.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100354>
- Bajo Sanjuán, A., González Álvarez, M., & Fernández Fernández, J. L. (2013). Responsabilidad social y empresa sostenible. *AdComunica*, 223–243.
<https://doi.org/10.6035/2174-0992.2013.5.14>
- Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347–354.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>

- Cáceres Quevedo, A. (2018). La responsabilidad social y la huella de carbono en las organizaciones. *Revista Estrategia Organizacional*, 7, 43–49.
- Camargo Mayorga, D. A., González Guzmán, J. M., & Jiménez Morales, P. (2024). Uso de compost en áreas forestales y de bioagricultura: un análisis para países europeos. *Sociedad y Economía*, 52, e10613415.
<https://doi.org/10.25100/sye.v0i52.13415>
- Cardona Alzate, C. A., Sánchez Toro, Ó. J., Ramírez Arango, J. A., & Alzate Ramírez, L. E. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista Colombiana De Biotecnología*, 6, 78–89.
<https://doi.org/https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/scholarly-journals/biodegradación-de-residuos-orgánicos-plazas/docview/1677632629/se-2>
- Carrera Erazo, B. M., & Andrade Amoroso, R. P. (2024). Contabilidad de Costos y economía circular: herramientas para modelos sostenibles. *Pacha. Revista de Estudios Contemporáneos Del Sur Global*, 5(16).
<https://doi.org/10.46652/pacha.v5i16.290>
- Chakraborty, N., Sarkar, G. M., & Lahiri, S. C. (2002). Effect of pesticide (Tara-909) on biomethanation of sewage sludge and isolated methanogens. *Biomass and Bioenergy*, 23, 75–80.
- Chatterjee, B., & Mazumder, D. (2024). Valorization of fruit and vegetable waste in a novel three-stage hybrid anaerobic digester for enhanced biogas production: Performance study and microbial community analysis. *Biochemical Engineering Journal*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109403>

- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–4064.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Chontal Hernández, M. A., Collado López, C. J., Orozco Rodríguez, N., Velasco Velasco, J., Gabriel Linares, A., & Romero López, G. (2019). Nutrient content of fermented fertilizers and its efficacy in combination with hydrogel in *Zea mays* L. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(3), 309–315.
<https://doi.org/10.1007/s40093-019-0248-8>
- Christ, K. L., & Burritt, R. L. (2015). Material flow cost accounting: A review and agenda for future research. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 108, pp. 1378–1389). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.005>
- Congreso de la República de Colombia. (2001). *Ley 697 de 2001: Por medio de la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía y se promueven energías alternativas*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>
- Congreso de la República de Colombia. (2004). *Ley 939 de 2004: Por medio de la cual se dictan disposiciones sobre cultivos de tardío rendimiento y se crean estímulos para la producción y comercialización de biocombustibles*. (Diario Oficial No. 45.756, Ed.). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=15594>
- Congreso de la República de Colombia. (2014). *Ley 1715 del 2014: Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional* (Diario Oficial No. 49.123, Ed.).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57453>

Congreso de la República de Colombia. (2015). *Ley 1753 del 2015: Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018: “Todos por un nuevo país.”*

<https://faolex.fao.org/docs/pdf/col146505.pdf>

Congreso de la República de Colombia. (2017). *Ley 1844 de 2017: Por medio de la cual se aprueba el “Acuerdo de París”, adoptado el 12 de diciembre de 2015, en París, Francia.* (Diario Oficial No. 50.236, Ed.).

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-1844-de-2017/>

Congreso de la República de Colombia. (2021). *Ley 2099 del 2021: Por medio de la cual se modifica la Ley 1715 de 2014, se dictan disposiciones para la transición energética y la dinamización del mercado energético, y se promueve la reactivación económica* (Diario Oficial No. 52.857, Ed.).

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

Consorcio NAM Ltda & VELZEA Ltda. (2000). *Gestión de los residuos orgánicos en las plazas de mercado de Bogotá (Contrato PNUD COL/96/23).*

Corporación de Abastos de Bogotá S.A.- CORABASTOS. (2023). *Informe de Gestión.*

<https://corabastos.com.co/>

Cortés Sierra, S., Chavarriaga, P., & López, C. (2010). Biocombustibles y biotecnología: la yuca (manihot esculenta) como modelo de investigación. In *Acta biol. Colomb* (Vol. 15, Issue 1).

Cristancho Montenegro, D. L. (2013). *Estimación del efecto del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la calidad del agua del Río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas.* Universidad Nacional de Colombia.

Cristancho Montenegro, D. L., Torres Mejía, A. S., & Lobatón Orduz, J. F. (2020). Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos

sanitarios en Colombia. *Revista Mutis*, 10(1), 25–45.

<https://doi.org/10.21789/22561498.1601>

Ćurčić, S., Milićević, D., Kilibarda, N., & Peulić, A. (2025). Assessing Biogas Production Potential from Organic Waste and Livestock Byproducts in a Serbian Municipality: Implications for Sustainable Food Systems. *Sustainability*, 17(7).

<https://doi.org/10.3390/su17073144>

Dalla Costa, A., & Persson, M. (2020). Las compañías como agentes transformadores mediante la adopción de responsabilidad social empresarial. Análisis de caso SAP, Argentina. *Palermo Business Review*, 185–204.

<https://doi.org/https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/scholarly-journals/las-compañías-como-agentes-transformadores/docview/2467627618/se-2>

Dams, J. G. (2023). Corporate Social Responsibility Management at URBASER. *UCJC Business and Society Review*, 20(78), 114–163.

<https://doi.org/10.3232/UBR.2023.V20.N3.03>

DANE. (2024). *Boletín técnico: Cuenta Ambiental y Económica de Flujos de Materiales de Residuos Sólidos (CAEFM-RS) 2021 – 2022 provisional*.

Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2009). Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1746–1760. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.013>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*.

Departamento Nacional de Planeación. (2008). *CONPES 3510: Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia*.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3510.pdf>

- Departamento Nacional de Planeación. (2011). *CONPES 3700: Estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%C3%B3micos/3700.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia potencia mundial de vida*. <https://www.dnp.gov.co>
- Departamento Nacional de Planeación. (2024, December 19). *El DNP se une con las centrales de abastos para fortalecer los procesos logísticos y la reducción de pérdida de alimentos*. https://www.dnp.gov.co/Prensa_/Noticias/Paginas/el-dnp-se-une-con-las-centrales-de-abastos-para-fortalecer-los-procesos-logisticos-y-la-reduccion-de-perdida-de-alimentos.aspx
- Fischer, A. (2022). *Circular economy – forging institutions: On how circular business model innovation shapes the circular economy while instigating the new rules of the game* [Tesis doctoral, Wageningen University & Research]. <https://doi.org/https://doi.org/10.18174/567287>
- García Rodríguez, A. M., & Gómez Franco, J. D. (2016). *Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaeróbica*. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/9067ab4d-3cb3-4db3-95f9-a7e14709eb86/content>
- Gómez, X., Cuetos, M. J., Cara, J., Morán, A., & García, A. I. (2006). Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*, 31(12), 2017–2024. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.029>
- Gómez-Camperos, J. A., Regino-Ubarnes, F. J., & Jaramillo, H. Y. (2022). Desarrollo de un sistema de supervisión de las variables de temperatura, presión y pH en un

- Biodigestor Anaeróbico. *Revista Ingenio*, 19(1), 22–27.
<https://doi.org/10.22463/2011642x.3035>
- Haandel, A. C. van, & Lettinga, G. (1994). *Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate* (John Wiley.).
- Hernandes, C., Taleb-Contini, S. H., Bartolomeu, A. C., Bertoni, B. W., França, S. C., & Pereira, A. M. (2014). Chemical Composition and Antifungal Activity of the Essential Oils of *Schinus weinmannifolius* Collected in the Spring and Winter. *Natural Product Communications*, 9, 1383–1386.
<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB26380/>.
- Khanal, S. Kumar. (2008). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and Applications*. Wiley-Blackwell.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Lohrasbi, M., Pourbafrani, M., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2010). Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresource Technology*, 101(19), 7382–7388.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.078>
- Martínez, S., Numpaque, H., & Alvarado, J. (2014). Efecto de la temperatura en la producción de biogás en un Bioreactor tipo Batch a través de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos orgánicos. *ENGI - Revista Electrónica de La Facultad de Ingeniería*, 3. <https://www.researchgate.net/publication/321229255>
Efecto de
- Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., Antón, A., & Boldrin, A. (2013). Compost benefits for agriculture evaluated by life

- cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 721–732. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0148-7>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Guía para la gestión sostenible de las plazas de mercado y centrales de abasto en Colombia*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2023/06/PLAZAS-DE-MERCADO-Y-CENTRALES-DE-ABASTO.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2025, September 10). *Minambiente lanza estrategia para frenar desperdicio de 10 millones de toneladas de alimentos*.
- Montesdeoca-Calderón, M. G., Gil-Saura, I., & Ruiz-Molina, M. E. (2020). How do food green practices and food waste management influence on the brand equity of restaurants? *Estudios Gerenciales*, 36(154), 100–113. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2020.154.3349>
- Montiel Corona, V., & Razo-Flores, E. (2018). Continuous hydrogen and methane production from Agave tequilana bagasse hydrolysate by sequential process to maximize energy recovery efficiency. *Bioresource Technology*, 249, 334–341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.032>
- Mosos Martínez, W. A., Cadavid Rodríguez, L. S., & Agudelo H., A. C. (2012). Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira. *Acta Agronómica*, 61(5), 97–98. <https://doi.org/https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/scholarly-journals/potencial-de-biogas-residuos-frutas-y-verduras/docview/1677570402/se-2>
- Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. *Secretaría de La Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*.

- https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/spanish_paris_agreement.pdf
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe: Vol. (LC/G.2681-P/Rev.3)*.
www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Naciones Unidas. (2019, July 25). *El Pacto Mundial de la ONU: La Búsqueda de Soluciones para Retos Globales*. <https://www.un.org/es/cr%C3%B3nica-onu/el-pacto-mundial-de-la-onu-la-b%C3%BAsqueda-de-soluciones-para-retos-globales>
- Ngabala, F. J., & Emmanuel, J. K. (2024). Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion-an alternative energy source. *Heliyon*, 10(23).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40632>
- Núñez Camargo, D. W. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16, 142–156.
<https://doi.org/https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/scholarly-journals/uso-de-residuos-agricolas-para-la-produccion/docview/1867560148/se-2>
- Nwokolo, N., Mukumba, P., Obileke, K., & Enebe, M. (2020). Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production. *Processes*, 8(10), 1–21.
<https://doi.org/10.3390/pr8101224>
- OECD. (2023). *Energía renovable distribuida en Colombia: Desbloqueando la inversión privada para zonas no-interconectadas*. <https://doi.org/10.1787/58322dd6-es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2024). *Rol de los mercados mayoristas de alimentos en los sistemas alimentarios*.
https://www.fao.org/co/PublicacionesFAOCO/TCP-Plazas/NOTA_7_FLAMA_Colombia.pdf

- Oviedo-Ocaña, E. R., Marmolejo-Rebellon, L. F., & Torres-Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 18(1), 31–42. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000100031&lng=es&tlng=es.
- Peñaranda Gonzalez, L. Victoria., Montenegro Gómez, S. Patricia., & Giraldo Abad, P. Andrea. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 141–150. <https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/scholarly-journals/aprovechamiento-de-residuos-agroindustriales-en/docview/1963138129/se-2>
- Pourbafrani, M., Forgács, G., Horváth, I. S., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2010). Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresource Technology*, 101(11), 4246–4250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.077>
- Puigvert, R., & Ángel, M. (2023). La importancia de la contabilización de los residuos en la economía circular: el método MCFA. In *Cuadernos del CIMBAGE* (Vol. 25). <https://orcid.org/0000-0002-7946-4996>
- Quintero González, J. R., & Quintero González, L. E. (2015). Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano. *Gestión y Ambiental*, 18(1), 179–188. <https://doi.org/http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169439782011>
- Ramírez-Rivas, I. D. (2013). Anaerobic Digestion Modeling: from One to Several Bacterial Populations. *TecnoLógicas*, 31, 181–201. <https://doi.org/https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.22430/22565337.117>
- Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., de la Rubia, M. A., & Borja, R. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: Evaluation of anaerobic

- biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 861–877. <https://doi.org/10.1002/jctb.2622>
- Ribeiro, A. D., Amaral Cardoso, M. N., Palhano Freire, J. C., Figueirêdo Júnior, E. C., Alexandrino Costa, M. M., Guimarães Silva, P., De Castro Gomes, D. Q., Melo de Brito, E. M., & Vieira Pereira, J. (2023). Antimicrobial activity of limonene: Integrative review. *Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 22(5), 581–593. <https://doi.org/10.37360/blacpma.23.22.5.42>
- Rincón-Velásquez, N. Y., & Castiblanco-Rozo, C. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. *Gestión y Ambiente*, 24(1), 98868. <https://doi.org/10.15446/ga.v24n1.98868>
- Romero Salvador, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(2), 331–345. <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Sánchez Guevara, A., & Martínez Galvis, M. R. (2018). Una mirada a la contabilidad ambiental en Colombia desde las perspectivas del desarrollo sostenible. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 27(1), 87–106. <https://doi.org/10.18359/rfce.3196>
- Sánchez Roque, Y., Pérez Luna, Y. del C., Saldaña Trinidad, S., Berrones Hernández, R., & Castillejos Yuca, D. A. (2023). Caracterización fisicoquímica de residuos orgánicos del Estado de Chiapas, México, destinados a la producción de biogás. *Revista Politécnica*, 19(38), 192–198. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v19n38a12>
- Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., & Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.103>


- Seriki, S. A., Lam, T. K., Wu, P. H., Suanon, F., & Yu, C. P. (2025). Influence of infrared light illumination on biogas production and microbial communities in anaerobic digestion of primary sludge and fruit and vegetable waste. *Bioresource Technology*, 437. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133146>
- Shihwu, S., & Tao, L. (2003). Inhibición del amoníaco en la digestión anaeróbica termófila. *Chemosphere*, 53(1), 43–52. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00434-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00434-X)
- Siatoya Ramírez, K. J., & Arce Portilla, Y. A. (2019). *Aprovechamiento de los residuos generados en la plaza de mercado de CORABASTOS para la elaboración de productos de valor agregado: contexto actual, perspectiva y posibles soluciones*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Sierra Rubio, M. Y., & Diaz Rubio, J. A. (2014). *Estudio de prefactibilidad planta de transformación de residuos orgánicos en bioetanol*. Universidad EAN.
- Simas, D. L. R., Amorim, S. H. B. M. de, De Oliveira, J. M., Alviano, D. S., & Silva, A. J. R. da. (2015). Characterization of essential oils of citrus fruits. *Citrus Research Technology*, 36(1), 15–26. <https://doi.org/10.5935/2236-3122.20150003>
- Soto-Paz, J., Oviedo-Ocaña, R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Manyoma-Velásquez, P. C. (2017). Composting of biowaste: Research trends and relevance in developing countries. *DYNA (Colombia)*, 84(203), 334–342. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.61549>
- Su, H., Tan, F., & Xu, Y. (2016). Enhancement of biogas and methanization of citrus waste via biodegradation pretreatment and subsequent optimized fermentation. *Fuel*, 181, 843–851. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.055>
- Ubillús Farfán, S. W., Valiente Saldaña, Y. M., & Patiño Ramírez, S. (2024). Estrategias aplicadas en la gestión de residuos sólidos en Latinoamérica: Revisión literaria.

- Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 9(17), 119–132.
<https://doi.org/10.35381/r.k.v8i17.3157>
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos -UAESP-. (2025). *Especiales UAESP Relleno Sanitario Doña Juana*. <https://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2024). *Informe final LEDS LAC: Lineamientos para la transición energética en Colombia*.
https://www1.upme.gov.co/Documents/Coop_internacional/2_LEDS_LAC_2024/Entregable_Informe_Final_LEDS_LAC_2024.pdf
- Uranga-Valencia, L. P., Pérez-Álvarez, S., Gabriel-Parra, R., Chávez-Medina, J. A., Magallanes-Tapia, M. A., Sánchez-Chávez, E., Muñoz-Márquez, E., García-García, S. A., Rascón-Solano, J., & Castruita-Esparza, L. U. (2025). Biogas Production from Organic Waste in the Forestry and Agricultural Context: Challenges and Solutions for a Sustainable Future. *Energies*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/en18123174>
- Van Zanten, H. H. E., Van Ittersum, M. K., & De Boer, I. J. M. (2019). The role of farm animals in a circular food system. *Global Food Security*, 21, 18–22.
<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.06.003>
- Vargas Pineda, O. I., Trujillo González, J. M., & Torres Mora, M. A. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia*, 23(2), 123–129.
<https://doi.org/10.22579/20112629.575>
- Vargas-García, Y., Pazmiño-Sánchez, J., & Dávila-Rincón, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión. *Revista Politecnica*, 48(2), 7–20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01>

- Vats, N., Khan, A. A., & Ahmad, K. (2019). Effect of substrate ratio on biogas yield for anaerobic co-digestion of fruit vegetable waste & sugarcane bagasse. *Environmental Technology and Innovation*, 13, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.01.003>
- Velásquez-Piñas, J. A., Calle-Roalcaba, O. D., Miramontes-Martínez, L. R., & Alonso-Gómez, L. A. (2023a). Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio. *Revista ION*, 36(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023003>
- Velásquez-Piñas, J. A., Calle-Roalcaba, O. D., Miramontes-Martínez, L. R., & Alonso-Gómez, L. A. (2023b). Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio. *Revista ION*, 36(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023003>
- Wikandari, R., Millati, R., Cahyanto, M. N., & Taherzadeh, M. J. (2014). Biogas production from citrus waste by membrane bioreactor. *Membranes*, 4(3), 596–607. <https://doi.org/10.3390/membranes4030596>
- Zhang, J., Loh, K. C., Li, W., Lim, J. W., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2017). Three-stage anaerobic digester for food waste. *Applied Energy*, 194, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.116>

Anexos

Anexo A. Formato de entrevista semiestructurada a expertos

	<p align="center">ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA Entrevista para docentes seleccionados para el panel de expertos</p>
<p>La siguiente entrevista forma parte del trabajo de investigación desarrollado en el marco de la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible, bajo la modalidad de monografía académica. Su propósito es consolidar una visión crítica y especializada sobre las alternativas propuestas para la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información recopilada mediante este ejercicio permitirá enriquecer los hallazgos preliminares de la investigación, evaluar la viabilidad técnica y ambiental de los métodos analizados, y aportar insumos estratégicos para su posible aplicación en escenarios reales y el diseño de estudios piloto orientados a modelos sostenibles de gestión de residuos.</p>	

<p align="center">Título del estudio Evaluación del potencial energético del biogás a partir de biorresiduos en comercializadoras de alimentos.</p>	
<p>Datos del experto entrevistado</p>	<p>Fecha: Nombre del experto: Entidad académica/institucional: Cargo o rol técnico:</p>

Contexto:
Se plantea las condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, tomando como referencia la operación de Corabastos S.A., en Bogotá. Se establece un marco técnico a partir de información secundaria basado en los siguientes parámetros:

Aspecto técnico	Descripción
Tipo de sustrato	Residuos orgánicos provenientes de frutas, hortalizas y verduras
Temperatura del proceso	Régimen mesofílico: (35 – 40°C), favorece la estabilidad biológica y el balance energético.
pH óptimo de operación	Mantener un rango entre 6.8 y 7.4, ideal para las bacterias acidogénicas y metanogénicas.
Pretratamientos recomendados al proceso de	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso físico: Triturado de los biorresiduos, para aumentar la superficie del sustrato y mejorar la accesibilidad de los microorganismos durante la DA.

<p>Digestión Anaeróbica (DA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso químico: Hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C para romper las estructuras celulares y liberar el aceite esencial de estos residuos, evaporándose el 99% del contenido del limoneno (compuesto inhibidor a la actividad microbiana). • Proceso biológico: Basado en la acción de hongos los <i>Phanerochaete chrysosporium</i> y <i>Aspergillus niger</i>, usados para descomponer los residuos cítricos antes de la digestión anaeróbica, con este pretratamiento se elimina inhibidores como el limoneno, se incrementa el pH de 1,8 a 5,6, favoreciendo la degradación de la celulosa y reduce los sólidos volátiles.
----------------------------------	--


Esta alternativa contribuye al desarrollo sostenible y la transición energética mediante el aprovechamiento de residuos agroalimentarios como fuente renovable, promoviendo una gestión eficiente de residuos sólidos orgánicos, reducción de gases de efecto invernadero y fortalecimiento de modelos de economía circular.

Preguntas

<p>1. ¿Cuál es su valoración sobre la pertinencia técnica de producir biogás a partir de los tipos de biorresiduos identificados en Corabastos S.A.?</p>
<p>2. Desde su experiencia, ¿cuáles serían los criterios más relevantes para caracterizar el poder energético de residuos como frutas, verduras y cítricos en procesos de digestión anaerobia?</p>
<p>3. ¿Qué nivel de confiabilidad asigna a las condiciones óptimas propuestas en la monografía (temperatura, pH y pretratamientos) para garantizar una producción eficiente de biogás?</p>
<p>4. ¿Qué recomendaciones daría para fortalecer el planteamiento de las condiciones óptimas de producción de biogás propuesto desde el enfoque de economía circular y transición energética, en términos operativos o estratégicos?</p>
<p>5. ¿Cómo percibe el impacto ambiental de esta alternativa en relación con la reducción de emisiones de GEI y la gestión responsable de residuos orgánicos?</p>

Agradezco profundamente su tiempo y disposición para participar en este ejercicio de validación técnica. Sus aportes representan un insumo fundamental para el fortalecimiento de la propuesta investigativa en torno a la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información suministrada será tratada con estricta confidencialidad y utilizada exclusivamente para fines académicos, como parte del trabajo de grado en la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible.

Anexo B. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 1

	<p>ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA Entrevista para docentes seleccionados para el panel de expertos</p>
<p>La siguiente entrevista forma parte del trabajo de investigación desarrollado en el marco de la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible, bajo la modalidad de monografía académica. Su propósito es consolidar una visión crítica y especializada sobre las alternativas propuestas para la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información recopilada mediante este ejercicio permitirá enriquecer los hallazgos preliminares de la investigación, evaluar la viabilidad técnica y ambiental de los métodos analizados, y aportar insumos estratégicos para su posible aplicación en escenarios reales y el diseño de estudios piloto orientados a modelos sostenibles de gestión de residuos.</p>	

<p>Título del estudio Evaluación del potencial energético del biogás a partir de biorresiduos en comercializadoras de alimentos.</p>	
<p>Datos del experto entrevistado</p>	<p>Fecha: 11-08-2025 Nombre del experto: Ana Katherine Diaz Duran Entidad académica/institucional: Agrosavia - EAN Cargo o rol técnico: Investigador posdoctoral.</p>

Contexto de la propuesta:

Se plantea las condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, tomando como referencia la operación de Corabastos S.A., en Bogotá. Se establece un marco técnico a partir de información secundaria basado en los siguientes parámetros:

Aspecto técnico	Descripción
Tipo de sustrato	Residuos orgánicos provenientes de frutas, hortalizas y verduras
Temperatura del proceso	Régimen mesofílico: (35 – 40°C), favorece la estabilidad biológica y el balance energético.
pH óptimo de operación	Mantener un rango entre 6.8 y 7.4, ideal para las bacterias acidogénicas y metanogénicas.
Pretratamientos recomendados al proceso de Digestión Anaeróbica (DA)	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso físico: Triturado de los biorresiduos, para aumentar la superficie del sustrato y mejorar la accesibilidad de los microorganismos durante la DA. • Proceso químico: Hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C

	<p>para romper las estructuras celulares y liberar el aceite esencial de estos residuos, evaporándose el 99% del contenido del limoneno (compuesto inhibidor a la actividad microbiana).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proceso biológico: Basado en la acción de hongos los <i>Phanerochaete chrysosporium</i> y <i>Aspergillus niger</i>, usados para descomponer los residuos cítricos antes de la digestión anaeróbica, con este pretratamiento se elimina inhibidores como el limoneno, se incrementa el pH de 1,8 a 5,6, favoreciendo la degradación de la celulosa y reduce los sólidos volátiles.
<p>Esta propuesta contribuye al desarrollo sostenible y la transición energética mediante el aprovechamiento de residuos agroalimentarios como fuente renovable, promoviendo una gestión eficiente de residuos sólidos orgánicos, reducción de gases de efecto invernadero y fortalecimiento de modelos de economía circular.</p>	
<p>Preguntas</p>	
<p>1. ¿Cuál es su valoración sobre la pertinencia técnica de producir biogás a partir de los tipos de biorresiduos identificados en Corabastos S.A.?</p> <p>La producción de biogás a partir de los biorresiduos identificados en Corabastos S.A. es técnicamente muy pertinente. Los residuos generados en centrales de abasto como Corabastos representan un importante riesgo ambiental y sanitario si no se gestionan adecuadamente, ya que pueden favorecer la proliferación de agentes patógenos y contaminar el entorno. Transformar estos desechos en biogás no solo contribuiría a mitigar estos problemas, sino que permitiría aprovechar un recurso energético limpio para suplir parte de las necesidades de la propia planta. Además, el subproducto restante, el biol, podría ser distribuido entre los agricultores y productores, promoviendo una economía circular y generando beneficios tanto ecológicos como sociales.</p>	
<p>2. Desde su experiencia, ¿cuáles serían los criterios más relevantes para caracterizar el poder energético de residuos como frutas, verduras y cítricos en procesos de digestión anaerobia?</p> <p>Para caracterizar el poder energético de residuos como frutas, verduras y cítricos en procesos de digestión anaerobia es necesario considerar su contenido de sólidos volátiles, ya que representan la fracción orgánica biodegradable con potencial de convertirse en metano, así como realizar un análisis elemental completo (C, H, O, N, S) para calcular el potencial teórico de metano y evaluar la relación carbono/nitrógeno, clave para evitar inhibiciones. También es importante determinar la materia orgánica total y biodegradable, caracterizar microbiológicamente el sustrato y el inóculo para verificar la presencia de comunidades anaerobias eficientes, medir parámetros como pH y alcalinidad para mantener condiciones óptimas de operación, y definir tiempos de retención hidráulico y de sólidos adecuados que aseguren una conversión completa. Adicionalmente, debe considerarse la aplicación de pretratamientos físicos o químicos que mejoren la</p>	

<p>digestibilidad del material. Todos estos criterios permiten estimar el potencial energético real y optimizar el diseño y operación del proceso.</p>
<p>3. ¿Qué nivel de confiabilidad asigna a las condiciones óptimas propuestas en la monografía (temperatura, pH y pretratamientos) para garantizar una producción eficiente de biogás?</p> <p>Asigno un alto nivel de confiabilidad a las condiciones óptimas propuestas en la monografía en cuanto a temperatura y pH, ya que están respaldadas tanto por experiencias propias como por evidencia reportada por otros autores. No obstante, es fundamental definir con precisión el tipo de pretratamiento a implementar, considerando que este implique bajos niveles de contaminación y no genere sobrecostos significativos. Asimismo, resulta clave seleccionar adecuadamente el inóculo y establecer la relación óptima entre sustrato e inóculo, con el fin de asegurar una producción de biogás estable y eficiente.</p>
<p>4. ¿Qué recomendaciones daría para fortalecer el planteamiento de las condiciones óptimas de producción de biogás propuesto desde el enfoque de economía circular y transición energética, en términos operativos o estratégicos?</p> <p>Para fortalecer el modelo propuesto desde el enfoque de economía circular y transición energética, recomiendo incorporar estrategias y acciones tanto operativas como estratégicas que potencien la eficiencia, sostenibilidad e impacto del proyecto. En términos operativos, es clave optimizar los procesos de pretratamiento (físico, químico y biológico) para maximizar la biodegradabilidad de los biorresiduos, minimizando costos y riesgos ambientales, así como mejorar la gestión del inóculo y la relación sustrato-inóculo para asegurar una producción de biogás estable y continua. Se recomienda promover la integración de tecnologías de monitoreo y control automatizado que permitan mantener condiciones óptimas de temperatura y pH, mejorando la eficiencia del proceso y reduciendo desperdicios. En lo estratégico, se sugiere fomentar alianzas colaborativas con agricultores, comercializadores y entes gubernamentales para la adecuada distribución y aprovechamiento del biol como fertilizante, creando valor compartido en la cadena productiva. Además, impulsar programas de capacitación y sensibilización sobre economía circular y energías renovables contribuirá a la adopción y escalabilidad del modelo. Finalmente, es importante considerar la articulación con políticas públicas locales que promuevan energías limpias y gestión sostenible de residuos, garantizando así la viabilidad económica, ambiental y social del proyecto a mediano y largo plazo.</p>
<p>5. ¿Cómo percibe el impacto ambiental de esta propuesta en relación con la reducción de emisiones de GEI y la gestión responsable de residuos orgánicos?</p> <p>El impacto ambiental de esta propuesta es positivo, ya que contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al aprovechar los biorresiduos para producir biogás en lugar de que estos se descompongan libremente generando metano. Esta propuesta, fortalece la sostenibilidad y fomenta la economía circular en el manejo de residuos agroalimentarios.</p>


Agradezco profundamente su tiempo y disposición para participar en este ejercicio de validación técnica. Sus aportes representan un insumo fundamental para el

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS
A PARTIR DE BIORRESIDUOS GENERADOS EN
COMERCIALIZADORAS DE ALIMENTOS**

101

fortalecimiento de la propuesta investigativa en torno a la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información suministrada será tratada con estricta confidencialidad y utilizada exclusivamente para fines académicos, como parte del trabajo de grado en la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible.

Anexo C. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 2

	<p>ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA Entrevista para docentes seleccionados para el panel de expertos</p>
<p>La siguiente entrevista forma parte del trabajo de investigación desarrollado en el marco de la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible, bajo la modalidad de monografía académica. Su propósito es consolidar una visión crítica y especializada sobre las alternativas propuestas para la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información recopilada mediante este ejercicio permitirá enriquecer los hallazgos preliminares de la investigación, evaluar la viabilidad técnica y ambiental de los métodos analizados, y aportar insumos estratégicos para su posible aplicación en escenarios reales y el diseño de estudios piloto orientados a modelos sostenibles de gestión de residuos.</p>	

<p>Título del estudio Evaluación del potencial energético del biogás a partir de biorresiduos en comercializadoras de alimentos.</p>	
<p>Datos del experto entrevistado</p>	<p>Fecha: 12 de agosto de 2025 Nombre del experto: Marie José Chéry Entidad académica/institucional: Universidad Ean Cargo o rol técnico: Profesora Asociada</p>

Contexto de la propuesta:

Se plantea las condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, tomando como referencia la operación de Corabastos S.A., en Bogotá. Se establece un marco técnico a partir de información secundaria basado en los siguientes parámetros:

Aspecto técnico	Descripción
Tipo de sustrato	Residuos orgánicos provenientes de frutas, hortalizas y verduras
Temperatura del proceso	Régimen mesofílico: (35 – 40°C), favorece la estabilidad biológica y el balance energético.
pH óptimo de operación	Mantener un rango entre 6.8 y 7.4, ideal para las bacterias acidogénicas y metanogénicas.
Pretratamientos recomendados al proceso de Digestión Anaeróbica (DA)	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso físico: Triturado de los biorresiduos, para aumentar la superficie del sustrato y mejorar la accesibilidad de los microorganismos durante la DA. • Proceso químico: Hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C

	<p>para romper las estructuras celulares y liberar el aceite esencial de estos residuos, evaporándose el 99% del contenido del limoneno (compuesto inhibidor a la actividad microbiana).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proceso biológico: Basado en la acción de hongos los <i>Phanerochaete chrysosporium</i> y <i>Aspergillus niger</i>, usados para descomponer los residuos cítricos antes de la digestión anaeróbica, con este pretratamiento se elimina inhibidores como el limoneno, se incrementa el pH de 1,8 a 5,6, favoreciendo la degradación de la celulosa y reduce los sólidos volátiles.
<p>Esta propuesta contribuye al desarrollo sostenible y la transición energética mediante el aprovechamiento de residuos agroalimentarios como fuente renovable, promoviendo una gestión eficiente de residuos sólidos orgánicos, reducción de gases de efecto invernadero y fortalecimiento de modelos de economía circular.</p>	
<p>Preguntas</p>	
<p>1. ¿Cuál es su valoración sobre la pertinencia técnica de producir biogás a partir de los tipos de biorresiduos identificados en Corabastos S.A.?</p> <p>La producción de biogás a partir de los residuos de Corabastos S.A. presenta una alta pertinencia técnica, ya que se trata de materiales con elevado contenido de humedad, y a su vez bajos contenidos de lignina, resultando en una elevada biodegradabilidad, lo que es idóneo para que sean sometidos a un proceso de digestión anaerobia.</p> <p>El triturado presentado como pretratamiento es técnicamente pertinente para incrementar la accesibilidad de los microorganismos a los residuos.</p> <p>En el tratamiento de hidrólisis ácida con ácido sulfúrico no menciona la concentración que se empleará de este ácido y considero que de esta depende que el proceso sea exitoso, porque si no se lleva a cabo un control riguroso de este parámetro operativo, en lugar de mejorar la eficiencia del proceso se afectaría la supervivencia de los microorganismos actuando también como inhibidor, y también se debe considerar la formación de sulfatos derivados del uso de este ácido. No sé si sería posible incluir un proceso de selección de los residuos a ser digeridos, evitando la introducción de residuos con presencia de limoneno, en lugar de requerirse la implementación de la hidrólisis ácida o si esto ya se evaluó y se definió que, si debían incluirse, pero creo que puede considerarse alternativas.</p> <p>En el planteamiento del pretratamiento se debe considerarse la facilidad en la operación de las etapas, considerando quienes serían los que estarían manejando el sistema que se instale y que preparación de capacidades técnicas requerirían, entonces esto debe ser un aspecto crítico para considerar definir el pretratamiento a emplear.</p> <p>2. Desde su experiencia, ¿cuáles serían los criterios más relevantes para caracterizar el poder energético de residuos como frutas, verduras y cítricos en procesos de digestión anaerobia?</p>	

Como parte de los parámetros más relevantes para determinar el poder energético de los residuos mencionados se encuentra el contenido de sólidos totales y volátiles y si es posible en potencial metanogénico, a fin de establecer la cantidad de metano que puede obtenerse en la digestión anaerobia de residuos, adicionalmente con esta prueba se puede establecer la relación de inóculo/material que genera la mayor cantidad de biogás y se puede establecer el rendimiento dependiendo de la mezcla de residuos a ser empleada.
También puede medirse la alcalinidad y capacidad tampón de los residuos, para definir la estabilidad que puede tener el valor de pH en el procesamiento de los residuos.

3. ¿Qué nivel de confiabilidad asigna a las condiciones óptimas propuestas en la monografía (temperatura, pH y pretratamientos) para garantizar una producción eficiente de biogás?

El rango de temperatura mesofílica (35–40 °C) y un pH óptimo cercano a 7,0 son parámetros altamente confiables para garantizar la estabilidad del proceso con este tipo de sustratos.

El triturado incluido en el pretratamiento si permite garantizar el contacto de los residuos y los microorganismos para que la conversión a biogás sea efectiva, por lo tanto, el nivel de confiabilidad es alto.

Por otro lado, la hidrólisis ácida con explosión de vapor, aunque puede ser efectiva para la remoción de limoneno, requiere el diseño de proceso y manejo cuidadoso para evitar a presencia de subproductos inhibidores, y la aparición de corrosión en los equipos, por lo tanto, este nivel de confiabilidad sería medio.

El proceso biológico mediante hongos requiere tiempo de residencia mayores y las condiciones de operación deben ser estables, entonces considerando la sensibilidad de estos sistemas el nivel de confiabilidad sería bajo-medio.

4. ¿Qué recomendaciones daría para fortalecer el planteamiento de las condiciones óptimas de producción de biogás propuesto desde el enfoque de economía circular y transición energética, en términos operativos o estratégicos?

Para fortalecer y garantizar la generación de biogás podría plantearse un esquema donde se incluya un porcentaje de residuos como estiércol bovino, aunque puede ser en baja proporción, a fin de regular la relación C/N y la presencia de microorganismos y nutrientes que permitan incrementar la generación de biogás o que periódicamente se incorpore el residuo.

Como se genera el digestato o biol, es necesario también verificar cómo se puede valorizar este digestato, entonces puede revisarse los estándares y normas para caracterización de abonos (por ejemplo, Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abono o fertilizantes y enmiendas de suelos).

Como es indispensable garantizar la correcta separación en la fuente del material a ser enviado al reactor, entonces sería importante realizar capacitaciones periódicas a las personas de Corabastos, para que siempre se realice de forma correcta esta operación.

5. ¿Cómo percibe el impacto ambiental de esta propuesta en relación con la reducción de emisiones de GEI y la gestión responsable de residuos orgánicos?

Lo esperado es que la implementación de esta alternativa de tratamiento impida que llegue una fracción de residuos orgánicos al relleno sanitario, lo que debería impactar positivamente en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas, dado que se evitan emisiones no controladas de metano en dicho relleno. De forma complementaria el biogás generado se convierte en una fuente de energía que puede sustituir otras fuentes como la leña, el carbón o el diésel, reduciendo los impactos por el uso de estos recursos no renovables. Finalmente, el digestato o biol resultante puede reemplazar otros fertilizantes o abonos sintéticos, los que permitiría reducir la huella ecológica asociada a su producción y por ende, la de los cultivos donde se apliquen dichos abonos.

Como posibles impactos negativos que se deben gestionar puede incluirse el uso de ácido sulfúrico que puede generar riesgos de corrosión o daño en los equipos donde se prepare o emplee, y de quemaduras o afectaciones por las personas que lo manipulen, por ende, es necesario tomar las medidas de manejo ambiental y contingencia necesarias para evitar estos posibles impactos.


El manejo de hongos puede asociarse igualmente con riesgos para las personas expuestas, por lo tanto, debe garantizarse el uso de todos los elementos de seguridad necesario y la adopción de medidas de control para evitar cualquier situación o accidente.

En la digestión anaerobia puede generarse fugas de metano, que es explosivo y tiene un potencial de calentamiento más de 20 veces mayor que el CO₂, e igualmente puede generarse H₂S, que es un gas tóxico y corrosivo, que requiere el uso de sistemas de desulfurización adecuado y con un mantenimiento periódico, por lo tanto, es necesario incluir los planes de manejo y contingencia para este equipo. Debe garantizarse el correcto manejo del digestato para evitar contaminación del suelo o de las zonas aledañas al sistema de tratamiento.

En todo caso, para tener un dato más aterrizado de la reducción de las emisiones de GEI puede realizarse el análisis de ciclo de vida y revisar allí la reducción en la huella de carbono que se puede esperar con la implementación de este proyecto.

Agradezco profundamente su tiempo y disposición para participar en este ejercicio de validación técnica. Sus aportes representan un insumo fundamental para el fortalecimiento de la propuesta investigativa en torno a la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información suministrada será tratada con estricta confidencialidad y utilizada exclusivamente para fines académicos, como parte del trabajo de grado en la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible.

Anexo D. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 3

	<p align="center">ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA Entrevista para docentes seleccionados para el panel de expertos</p>
<p>La siguiente entrevista forma parte del trabajo de investigación desarrollado en el marco de la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible, bajo la modalidad de monografía académica. Su propósito es consolidar una visión crítica y especializada sobre las alternativas propuestas para la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información recopilada mediante este ejercicio permitirá enriquecer los hallazgos preliminares de la investigación, evaluar la viabilidad técnica y ambiental de los métodos analizados, y aportar insumos estratégicos para su posible aplicación en escenarios reales y el diseño de estudios piloto orientados a modelos sostenibles de gestión de residuos.</p>	

<p align="center">Título del estudio Evaluación del potencial energético del biogás a partir de biorresiduos en comercializadoras de alimentos.</p>	
<p>Datos del experto entrevistado</p>	<p>Fecha: 06/08/2025 Nombre del experto: Leidy Natalia Zapata Restrepo Entidad académica/institucional: Universidad EAN Cargo o rol técnico: Profesor.</p>

Contexto de la propuesta:

Se plantea las condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, tomando como referencia la operación de Corabastos S.A., en Bogotá. Se establece un marco técnico a partir de información secundaria basado en los siguientes parámetros:

Aspecto técnico	Descripción
Tipo de sustrato	Residuos orgánicos provenientes de frutas, hortalizas y verduras
Temperatura del proceso	Régimen mesofílico: (35 – 40°C), favorece la estabilidad biológica y el balance energético.
pH óptimo de operación	Mantener un rango entre 6.8 y 7.4, ideal para las bacterias acidogénicas y metanogénicas.
Pretratamientos recomendados al proceso de Digestión Anaeróbica (DA)	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso físico: Triturado de los biorresiduos, para aumentar la superficie del sustrato y mejorar la accesibilidad de los microorganismos durante la DA. • Proceso químico: Hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido

	<p>sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C para romper las estructuras celulares y liberar el aceite esencial de estos residuos, evaporándose el 99% del contenido del limoneno (compuesto inhibidor a la actividad microbiana).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proceso biológico: Basado en la acción de hongos los <i>Phanerochaete chrysosporium</i> y <i>Aspergillus niger</i>, usados para descomponer los residuos cítricos antes de la digestión anaeróbica, con este pretratamiento se eliminan inhibidores como el limoneno, se incrementa el pH de 1,8 a 5,6, favoreciendo la degradación de la celulosa y reduce los sólidos volátiles.
<p>Esta propuesta contribuye al desarrollo sostenible y la transición energética mediante el aprovechamiento de residuos agroalimentarios como fuente renovable, promoviendo una gestión eficiente de residuos sólidos orgánicos, reducción de gases de efecto invernadero y fortalecimiento de modelos de economía circular.</p>	
<p>Preguntas</p>	
<p>5. ¿Cuál es su valoración sobre la pertinencia técnica de producir biogás a partir de los tipos de biorresiduos identificados en Corabastos S.A.?</p>	
<p>6. Desde su experiencia, ¿cuáles serían los criterios más relevantes para caracterizar el poder energético de residuos como frutas, verduras y cítricos en procesos de digestión anaerobia?</p>	
<p>7. ¿Qué nivel de confiabilidad asigna a las condiciones óptimas propuestas en la monografía (temperatura, pH y pretratamientos) para garantizar una producción eficiente de biogás?</p>	
<p>8. ¿Qué recomendaciones daría para fortalecer el planteamiento de las condiciones óptimas de producción de biogás propuesto desde el enfoque de economía circular y transición energética, en términos operativos o estratégicos?</p>	
<p>9. ¿Cómo percibe el impacto ambiental de esta propuesta en relación con la reducción de emisiones de GEI y la gestión responsable de residuos orgánicos?</p>	

Saludos cordiales.

Adjunto respuestas:

1. Pertinencia técnica de producir biogás a partir de los biorresiduos de Corabastos S.A.: Estoy de acuerdo con la pertinencia técnica de esta iniciativa. Los residuos de frutas, verduras y cítricos presentes en Corabastos S.A. son altamente biodegradables, con bajo contenido de lignina y alta humedad, lo cual los hace adecuados para la digestión anaerobia. Además, su disponibilidad constante y en volumen significativo favorece la viabilidad técnica y logística del proyecto.

2. Criterios para caracterizar el poder energético de residuos como frutas, verduras y cítricos:

Los principales criterios incluyen:

- Contenido de sólidos volátiles (SV): Determina la fracción biodegradable y la cantidad potencial de biogás.
- Relación C/N (carbono/nitrógeno): Ideal entre 20:1 y 30:1 para evitar inhibiciones microbiológicas.
- pH inicial y composición ácida del residuo: Los residuos cítricos requieren atención por su acidez y contenido de limoneno, que puede inhibir la metanogénesis.
- Potencial bioquímico de metano (BMP): Evaluado en condiciones controladas para estimar el poder energético específico ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$).
- Contenido de humedad y materia seca (%): Para determinar el tipo de reactor y la necesidad de co-sustratos.

3. Confiabilidad de las condiciones óptimas propuestas (temperatura, pH, pretratamientos):

Las condiciones propuestas en la monografía son técnicamente apropiadas. La digestión anaerobia se recomienda operar en rango mesofílico (35–38 °C), con mayor estabilidad biológica y menor requerimiento energético que el rango termofílico (50–55 °C). El pH debe mantenerse entre 6.8 y 7.2, controlando la acidificación por frutas cítricas. Los pretratamientos físico-químicos, como la neutralización del pH o la dilución con residuos de menor acidez, aumentan la eficiencia del sistema.

Para garantizar confiabilidad, es crucial implementar sistemas de monitoreo continuo de temperatura, pH, presión interna y composición del biogás.

4. Recomendaciones desde la economía circular y la transición energética:

- Co-digestión con otros residuos orgánicos para mejorar la relación C/N y estabilidad del proceso.
- Uso del digestato como fertilizante orgánico dentro de circuitos agroecológicos urbanos y rurales.
- Implementación de planes de gestión integral de residuos orgánicos, desde su segregación en origen hasta su valorización energética.
- Vinculación con estrategias locales de transición energética, promoviendo el biogás como sustituto de GLP o diésel en procesos térmicos o generación eléctrica distribuida.
- Evaluación del potencial de créditos de carbono por reducción de emisiones de metano y CO_2 .


5. Impacto ambiental y control de seguridad operacional:

La propuesta tiene un impacto ambiental positivo al reducir significativamente las emisiones de GEI por descomposición anaerobia en vertederos. Además, contribuye a la gestión responsable de residuos orgánicos y la generación de energía renovable. No obstante, se debe considerar un estricto control de seguridad para evitar riesgos por acumulación de biogás (mezclas explosivas), mediante:

- Sistemas de ventilación adecuados,
- Sensores de gas metano y sulfuro de hidrógeno (H₂S),
- Válvulas de alivio de presión en los biodigestores, y
- Protocolos de operación y mantenimiento periódico, incluyendo capacitación del personal en bioseguridad.

Agradezco profundamente su tiempo y disposición para participar en este ejercicio de validación técnica. Sus aportes representan un insumo fundamental para el fortalecimiento de la propuesta investigativa en torno a la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información suministrada será tratada con estricta confidencialidad y utilizada exclusivamente para fines académicos, como parte del trabajo de grado en la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible.

Anexo E. Respuestas de la entrevista por parte de la experta 4

	<p align="center">ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA Entrevista para docentes seleccionados para el panel de expertos</p>
<p>La siguiente entrevista forma parte del trabajo de investigación desarrollado en el marco de la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible, bajo la modalidad de monografía académica. Su propósito es consolidar una visión crítica y especializada sobre las alternativas propuestas para la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información recopilada mediante este ejercicio permitirá enriquecer los hallazgos preliminares de la investigación, evaluar la viabilidad técnica y ambiental de los métodos analizados, y aportar insumos estratégicos para su posible aplicación en escenarios reales y el diseño de estudios piloto orientados a modelos sostenibles de gestión de residuos.</p>	

<p align="center">Título del estudio Evaluación del potencial energético del biogás a partir de biorresiduos en comercializadoras de alimentos.</p>	
<p>Datos del experto entrevistado</p>	<p>Fecha: 18 de agosto de 2025 Nombre del experto: Johanna Karina Solano Meza Entidad académica/institucional: Universidad EAN Cargo o rol técnico: Docente asociado</p>

<p>Contexto de la propuesta:</p>									
<p>Se plantea las condiciones óptimas para la producción de biogás a partir de los biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos, tomando como referencia la operación de Corabastos S.A., en Bogotá. Se establece un marco técnico a partir de información secundaria basado en los siguientes parámetros:</p>									
<p>Aspecto técnico</p>	<p align="center">Descripción</p> <table border="1"> <tr> <td data-bbox="266 1430 570 1507">Tipo de sustrato</td> <td data-bbox="570 1430 1429 1507">Residuos orgánicos provenientes de frutas, hortalizas y verduras</td> </tr> <tr> <td data-bbox="266 1507 570 1585">Temperatura del proceso</td> <td data-bbox="570 1507 1429 1585">Régimen mesofílico: (35 – 40°C), favorece la estabilidad biológica y el balance energético.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="266 1585 570 1663">pH óptimo de operación</td> <td data-bbox="570 1585 1429 1663">Mantener un rango entre 6.8 y 7.4, ideal para las bacterias acidogénicas y metanogénicas.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="266 1663 570 1896">Pretratamientos recomendados al proceso de Digestión Anaeróbica (DA)</td> <td data-bbox="570 1663 1429 1896"> <ul style="list-style-type: none"> • Proceso físico: Triturado de los biorresiduos, para aumentar la superficie del sustrato y mejorar la accesibilidad de los microorganismos durante la DA. • Proceso químico: Hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C </td> </tr> </table>	Tipo de sustrato	Residuos orgánicos provenientes de frutas, hortalizas y verduras	Temperatura del proceso	Régimen mesofílico: (35 – 40°C), favorece la estabilidad biológica y el balance energético.	pH óptimo de operación	Mantener un rango entre 6.8 y 7.4, ideal para las bacterias acidogénicas y metanogénicas.	Pretratamientos recomendados al proceso de Digestión Anaeróbica (DA)	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso físico: Triturado de los biorresiduos, para aumentar la superficie del sustrato y mejorar la accesibilidad de los microorganismos durante la DA. • Proceso químico: Hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C
Tipo de sustrato	Residuos orgánicos provenientes de frutas, hortalizas y verduras								
Temperatura del proceso	Régimen mesofílico: (35 – 40°C), favorece la estabilidad biológica y el balance energético.								
pH óptimo de operación	Mantener un rango entre 6.8 y 7.4, ideal para las bacterias acidogénicas y metanogénicas.								
Pretratamientos recomendados al proceso de Digestión Anaeróbica (DA)	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso físico: Triturado de los biorresiduos, para aumentar la superficie del sustrato y mejorar la accesibilidad de los microorganismos durante la DA. • Proceso químico: Hidrólisis ácida y explosión de vapor, consiste en la mezcla de los residuos cítricos, ácido sulfúrico y agua, con una inyección de vapor a 150 °C 								

	<p>para romper las estructuras celulares y liberar el aceite esencial de estos residuos, evaporándose el 99% del contenido del limoneno (compuesto inhibidor a la actividad microbiana).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proceso biológico: Basado en la acción de hongos los <i>Phanerochaete chrysosporium</i> y <i>Aspergillus niger</i>, usados para descomponer los residuos cítricos antes de la digestión anaeróbica, con este pretratamiento se eliminan inhibidores como el limoneno, se incrementa el pH de 1,8 a 5,6, favoreciendo la degradación de la celulosa y reduce los sólidos volátiles.
<p>Esta propuesta contribuye al desarrollo sostenible y la transición energética mediante el aprovechamiento de residuos agroalimentarios como fuente renovable, promoviendo una gestión eficiente de residuos sólidos orgánicos, reducción de gases de efecto invernadero y fortalecimiento de modelos de economía circular.</p>	
<p>Preguntas</p>	
<p>1. ¿Cuál es su valoración sobre la pertinencia técnica de producir biogás a partir de los tipos de biorresiduos identificados en Corabastos S.A.?</p> <p>El área de estudio en este caso Corabastos genera grandes volúmenes de residuos orgánicos como los restos de partes que no se comercializan, como por ejemplo cáscaras y tuzas de mazorca, así mismo algunas frutas y verduras que por su calidad no son aptas para la venta. Estos residuos son buenos para procesos de digestión anaerobia y dadas sus características puede generar gran cantidad de metano en el proceso. Por el origen de estos tienen también baja carga de metales pesados o aditivos químicos lo que también favorece el proceso. Además, este sitio mantiene un volumen constante de generación lo que garantizaría un flujo continuo de alimento al proceso, teniendo presente una separación adecuada en la fuente.</p>	
<p>2. Desde su experiencia, ¿cuáles serían los criterios más relevantes para caracterizar el poder energético de residuos como frutas, verduras y cítricos en procesos de digestión anaerobia?</p> <p>La determinación del poder energético es parte fundamental para la predicción del comportamiento del proceso, principalmente el cálculo teórico inicial del potencial de metano que podría generarse. Para una caracterización completa se necesitaría medir Sólidos volátiles y totales, Demanda bioquímica de Oxígeno, Análisis elemental, humedad, pH, potencial bioquímico de metano, Contenido de Lignina y celulosa principalmente. Igualmente es necesario tener en cuenta la aplicación de pruebas estandarizadas para cada una de las variables a medir.</p>	
<p>3. ¿Qué nivel de confiabilidad asigna a las condiciones óptimas propuestas en la monografía (temperatura, pH y pretratamientos) para garantizar una producción eficiente de biogás?</p> <p>Se podría asumir una confiabilidad alta con estos parámetros para la producción de biogás, ya que para esta temperatura se favorece la actividad metanogénica y por tanto estabilidad biológica, así mismo el pH propuesto es favorable para esta etapa</p>	

del proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, es necesario hacer seguimiento de pH por posible acumulación de AGV's. Estos valores son parámetros ya aplicados en contextos realidad dando buenos resultados en cuanto a estabilidad biológica y eficiencia energética.

4. ¿Qué recomendaciones daría para fortalecer el modelo propuesto desde el enfoque de economía circular y transición energética, en términos operativos o estratégicos?

Para favorecer el enfoque de economía circular es importante aprovechar los posibles subproductos del proceso. Otra estrategia estaría dada al cálculo permanente del porcentaje del residuo valorizado y el metano generado. Dado que en el proceso se consume energía una posibilidad sería tener sistemas solares térmicos auxiliares para calentamiento. El diseño de sistemas que sean flexibles en su diseño abre la posibilidad que sean replicables y escalables para implementarlos en zonas con condiciones climáticas y residuos orgánicos diversos. Incluir análisis de viabilidad y relación costo -beneficio en el planteamiento del proyecto.

5. ¿Cómo percibe el impacto ambiental de esta propuesta en relación con la reducción de emisiones de GEI y la gestión responsable de residuos orgánicos?

Al capturar el metano en el proceso se está evitando la liberación de este a la atmósfera, además que este biogás se aprovecha para diferentes usos energéticos. En cuanto a la gestión responsable de los residuos esta se refleja en la valorización energética de los mismos, en la posible generación de subproductos como biofertilizantes que pueden generar un ingreso adicional para las comunidades, y en la minimización de residuos que van a los rellenos sanitarios disminuyendo considerablemente impactos ambientales negativos. Todo esto va en línea con el cumplimiento de los ODS para los países además de generar una sinergia con las rutas energéticas, las cuales buscan la sustitución de combustibles fósiles y la posibilidad energética en zonas no interconectadas. El proceso de digestión anaerobia permite la transformación de residuos en recursos lo que apoya al cumplimiento de compromisos climáticos.

Agradezco profundamente su tiempo y disposición para participar en este ejercicio de validación técnica. Sus aportes representan un insumo fundamental para el fortalecimiento de la propuesta investigativa en torno a la producción de biogás a partir de biorresiduos generados en comercializadoras de alimentos. La información suministrada será tratada con estricta confidencialidad y utilizada exclusivamente para fines académicos, como parte del trabajo de grado en la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible.